

Landnutzungskartierungen mit multitemporalen Landsat-MSS-Daten

Ein Beitrag zur Bildregistrierung

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Philosophischen Doktorwürde
vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II
der Universität Zürich

von

JÜRGEN LICHTENEGGER
von Kolliken (AG)

Begutachtet von Herrn
Prof. Dr. H. Haefner



Juris Druck + Verlag Zürich
1980



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Landnutzungskartierungen mit multitemporalen Landsat-MSS-Daten

Ein Beitrag zur Bildregistrierung

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Philosophischen Doktorwürde
vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II
der Universität Zürich

von

JÜRIG LICHTENEGGER
von Kolliken (AG)

Begutachtet von Herrn
Prof. Dr. H. Haefner



Juris Druck + Verlag Zürich
1980

Landwirtschaftlichen mit multifunktionalen
Landes-MS-Daten

Ein Beitrag zur Informationsverarbeitung

Landwirtschaftliche Fakultät

Landwirtschaftliche Fakultät

Landwirtschaftliche Fakultät

Landwirtschaftliche Fakultät

Landwirtschaftliche Fakultät



ISBN 3 260 04816 2

VORWORT

Landsat-Daten auszuwerten ist bereits zur festen Tradition der Gruppe Luftbildinterpretation und Fernerkundung am Geographischen Institut der Universität Zürich geworden. Die vorliegende Arbeit bezweckt, die Interpretationsmethoden zu erweitern und zu verfeinern, um die Fernerkundung der operationellen Anwendung zuzuführen.

In den Jahren 1976 bis 1979 hatte ich Gelegenheit, mich mit den vielen Problemen der Fernerkundung auseinanderzusetzen. Dabei hat sich die erfreuliche interdisziplinäre Zusammenarbeit, vorab mit dem Institut für Kommunikationstechnik, weiter verstärkt.

Der Dank geht zuerst an den "Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung", der das Projekt "Quantitative Analyse multidimensionaler Fernerkundungsdaten" finanzierte und mir ermöglichte, in diesem Rahmen die vorliegende Dissertation auszuführen.

Die Arbeit stand unter der Leitung von Prof. Dr. H. Haefner, dem ich an dieser Stelle für seine Unterstützung danke.

Eine fruchtbare Zusammenarbeit bestand vor allem zwischen dem Geographischen Institut der Universität und dem Institut für Kommunikationstechnik (vormals Photographisches Institut) der ETH Zürich. Hier hatte Dr. K. Seidel fachlich und menschlich stets ein offenes Ohr für die vielen Forderungen, die ein Geograph an die digitale Verarbeitung von Fernerkundungsdaten stellt. Ihm sei ganz herzlich für seine aufopfernde Mühe gedankt. Ohne die vielen computertechnischen Hilfen wäre meine Arbeit in dieser Form nicht zustande gekommen. Einen entscheidenden Beitrag leistete auch Prof. Dr. O. Kübler (neuernannter Vorsteher dieses Institutes), indem er mir die Korrelationsroutinen zur Verfügung stellte. Ihm, sowie Frau S. Ruchti, die mich auch in mathematischer Hinsicht beriet und diese Programme für Landsat-Daten zugänglich machte, danke ich ebenfalls herzlich. Stark beansprucht habe ich auch die Zeit von Dr. A. Funkhouser, der die Aufbelichtungsmaschine PHOTOMATION P1700 betreut. Auch ihm danke ich herzlich. Einschliessen in diesen Kreis möchte ich auch Dr. F.

Tomamichel, für die tatkräftige Beratung in fotografischen Problemen, und die Damen E. Kuhn, B. Heller und V. Baumann. Ihnen verdanke ich die guten Reproarbeiten.

Danken möchte ich weiter Herrn A. Paschke. Er machte mir weitere Programme am Rechenzentrum der ETH zugänglich.

Einen Teil der Auswertearbeiten führte ich am Rechenzentrum der Universität aus, dessen von Dr. F. Fasler (Geographisches Institut der Universität) aufgebautes interaktives Bildinterpretationssystem sich auch für meine Bedürfnisse bestens bewährte. F. Fasler beriet mich in computertechnischen Belangen und war auch empfänglich für meine speziellen Wünsche. Auch ihm bin ich zu Dank verpflichtet.

Viele Anregungen erhielt ich von Prof. D. Steiner (Geographisches Institut der ETHZ) und von meinen Kollegen Dr. K. Itten, Dr. D. Nüesch, Dr. K. Stänz, R. Muri, U. Geiser, R. Schoch und E. Meier. Ihnen allen und Frau E. Kupka, die das Administrative besorgte, sei gedankt.

Das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie stellte mir diverse Vermessungsinstrumente zur Verfügung. Dafür danke ich den Herren Prof. Dr. H. Schmid und W. Wattenhofer.

Der Militärflugdienst Dübendorf machte mir die Luftbilder vom "Grossen Moos" zugänglich. Herrn Oberstleutnant E. Bolli sei dafür gedankt.

In der Feldarbeit waren mir mit Rat und Unterlagen behilflich: Die Herren Direktoren der Domäne Witzwil, Herr Loosli und von Bellechasse, Herr Rentsch, ferner die Herren agr. ing. Käser und Gysel, die Kreisförster von Ins, Herr v. Wattenwyl und von Sugiez, Herr Jendly und Herr v. Waldkirch vom kantonalen Meliorationsamt Bern.

In den Dank einschliessen möchte ich auch meine Eltern, die mich während der Feldbegehung tatkräftig unterstützten und meine Frau Barbara, für ihre Mithilfe im Feld und am Schreibtisch.

Zürich, im Februar 1980

Jürg Lichtenegger

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	1
EINLEITUNG	6
ZIELSETZUNG UND ARBEITSGANG	8
THEORETISCHER TEIL	
A. FERNERKUNDUNG UND LANDNUTZUNG	11
1. REFLEXIONSVERHALTEN DER VEGETATION	13
1.1. Messen der Reflexion	13
2. MULTITEMPORALE AUSWERTUNG VON FERNERKUNDUNGSDATEN	15
3. ZUR TRENNBARKEIT VON LANDNUTZUNGSKATEGORIEN	19
3.1. Systembedingte Gründe	19
3.2. Problem der Mischpixel	19
3.3. Einfluss der Atmosphäre	20
3.4. Streuung der Messwerte innerhalb einer Land- nutzungskategorie	22
3.4.1. Bildgeometrische Ursachen	22
3.4.2. Naturbedingte Ursachen	23
3.4.2.1. Vegetationsbeginn	23
3.4.2.2. Veränderung durch den Windeinfluss	25
3.4.2.3. Stress-Situationen der Pflanze	25
3.4.2.4. Exposition und Sonneneinfallswinkel	25
3.4.2.5. Bodenfarbe	28
4. DER LANDSAT UND SEIN MSS-SYSTEM	30
4.1. Technische Daten von Landsat	30
4.2. Vorverarbeitung der Daten	33
5. DIE VERARBEITUNG VON MULTISPEKTRALDATEN	37
5.1. Radiometrische Transformationen	38
5.2. Geometrische Transformationen	38
5.3. Digitale Bildinterpretation	39
5.3.1. Zur schrittweisen, linearen Diskriminanz- Analyse	42
5.3.2. Zur Klassierung mit DCLASS und MCLASS	42
5.3.3. Zur Stichprobengrösse	43
B. DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET "GROSSES MOOS"	44
1. NATURGESCHICHTLICHER ABRISS	44
2. DIE HEUTIGE BEWIRTSCHAFTUNG	46
3. FERNERKUNDUNG IM "GROSSEN MOOS"	48

PRAKTISCHER TEIL

C. DIE BILDREGISTRIERUNG	50
1. DIE PASSPUNKTMETHODE	52
1.1. Ein Spiegelexperiment	53
1.2. Berechnung von Azimut und Elevation der Reflektorachse	53
1.3. Zur praktischen Durchführung eines Spiegel-experimentes	55
1.4. Auswertung des Spiegelexperimentes	59
1.5. Vor- und Nachteile der Passpunktmethode mit Spiegelreflektoren	70
2. DIE VISUELLE DIFFERENZBILDANALYSE	71
2.1. Vor- und Nachteile der visuellen Differenzbild-analyse	72
3. DIE DIGITALE BILDKORRELATION	72
3.1. Die praktische Anwendung der digitalen Bild-korrelation	75
4. GEOMETRISCHE TRANSFORMATIONEN FÜR DIE BILDREGISTRIERUNG	81
4.1. Beurteilung der Qualität der Bildregistrierung	85
4.2. Spiegelpasspunkte und digitale Bildkorrelation	86
4.3. Ergänzende Bemerkungen zu multitemporalen Daten	87
D. DER EINFLUSS DER ATMOSPHAERE IM TESTGEBIET	90
1. VERGLEICH VON LANDSAT-DATEN MIT BODENMESSUNGEN	90
1.1. Vergleich von Rohdaten mit vorverarbeiteten Daten	91
1.2. Vergleich der Landsat-Aufnahmen vom 19. und 20. Juni	95
1.3. Vergleich radiometrischer Messungen am Boden mit Stichproben aus Landsat-Daten	97
E. KLASSIFIKATION VON MULTITEMPORALEN MSS-DATEN	101
1. ALLGEMEINES ZUR KLASSIFIKATION	101
1.1. Festlegen der Kategorien	102
1.2. Erhebung von Stichproben	103
2. KLASSIERUNG MIT SCHRITTWEISER, LINEARER DISKRIMINANZ-ANALYSE (BMD7MT)	105
2.1. Vergleich der monotemporalen und multi-temporale Kontrollklassifikationen	106
3. KLASSIERUNG MIT DCLASS UND MCLASS	115

4. VERGLEICH DER KLASSIFIKATIONSVERFAHREN	117
4.1. Bodenkontrolle	117
4.2. Vergleich der Bodenkontrolle mit den Klassierungen	118
4.3. Vergleich vom MCLASS mit BMD7MT	119
4.4. Flächenvergleich "Mais" nach Anbauplan und Klassifikation	122
5. GLAETTUNG DER KLASSIERTEN BILDDATEN	123
F. DARSTELLUNG VON RASTERDATEN	125
1. FARBDARSTELLUNG VON MULTISPEKTRALDATEN UND VON KLASSIERTEN BILDERN	126
1.1. Bemerkungen zur Farbtafel 1 und 2: Landsat- Bildausschnitte "Grosses Moos", Mai bis September 1976	127
1.2. Bemerkungen zur Farbtafel 3: Multitemporale Klassifikation	132
1.3. Bemerkungen zur Farbtafel 4: "Grosses Moos" 1976, Darstellung von Hauptkomponenten	132
G. AUSBLICK	137
ZUSAMMENFASSUNG	139
SUMMERY	142
LITERATURVERZEICHNIS	144
ANHANG	151
FARBTAFELN	

EINLEITUNG

Mit dem Start der Satellitengeneration "Landsat" für die Erderkundung konnte ein weltweites Interesse an Satellitenbilddaten geweckt werden. Dank der erschwinglichen Erstehungskosten setzte eine grosse Nachfrage nach diesem Datenmaterial ein. Bis Juli 1978 sind von Landsat 1, 2 und 3 über 500'000 Bilder - über den ganzen Globus verteilt - aufgenommen worden, was der Datenmenge von 17 Mio. MByte entspricht.

Die hohe Repetitionsrate von 18 Tagen und die konstante Aufnahmequalität ermöglichen es, Veränderungen auf der Erde nicht nur flächenhaft, sondern auch zeitlich zu erfassen. Die vorliegende Arbeit widmet sich diesem Aspekt.

Mit mosaikartig zusammengesetzten Übersichtsbildern ganzer Länder wie der USA (NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY 1976) oder auch der Schweiz (BAER 1976, SEIDEL et al. 1979) versucht man ein breites Publikum anzusprechen. Parallel dazu laufen weltweit unzählige wissenschaftliche Projekte, die sich mit der operationellen Verwendung von Satellitendaten in den Bereichen der Geologie, der Landnutzungskartierung, der Forstwirtschaft, der Hydrologie u.a.m. befassen.

Obschon das Verarbeiten derartiger Datenmengen Grosscomputer verlangt, bleibt für einfachere Auswertemethoden, wie für das visuelle Interpretieren von fotografischen Bildprodukten, noch viel Raum. Schon heute werden Satellitenbild-Kartierungen verwendet, um Grundlagen für Entscheidungen in der Planung zu erarbeiten (TOM et al. 1978). Ernteprognosen oder Erzprospektionen durchzuführen, ist heute aber noch nicht unbestritten. Es zeichnet sich jedoch ab, dass der Informationshunger über unsere sich derart schnell verändernde Erde nur durch wachsame und unbestechliche Augen vom Weltraum aus zu stillen ist.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Methoden, eine detaillierte Landnutzungskartierung mit Landsat durchzuführen. Als Unterscheidungskriterium der Nutzungsarten werden dabei nicht nur die spektralen Eigenschaften, sondern auch ihre zeitliche Veränderungen innerhalb einer Vegetationsperiode untersucht.

ZIELSETZUNG UND ARBEITSGANG

Es wird hier der Versuch gemacht, im Rahmen nationaler Landnutzungserhebungen bewirtschaftete und nicht bewirtschaftete Flächen qualitativ und quantitativ zu erfassen, und dazu moderne Methoden der Fernerkundung einzusetzen. Das "Grosse Moos", als eines der bedeutenden Produktionsgebiete für landwirtschaftliche Erzeugnisse in der Schweiz, wurde als Testgebiet dafür ausgewählt.

Es soll untersucht werden, wieweit sich einzelne Landnutzungskategorien (Mais, Getreide etc.) mit Daten vom Erderkundungssatelliten Landsat getrennt erfassen lassen.

Die Zahl der Kategorien, die aufgrund ihres Verhaltens in den 4 Landsat-Spektralkanälen klassiert werden können, ist beschränkt. Es wird deshalb versucht, die Unterscheidungskriterien zu verbessern, indem eine Zeitreihe von Aufnahmen ausgewertet wird. Untersucht man das spektrale Verhalten einzelner Nutzungskategorien während einer ganzen Vegetationsperiode, fällt auf, dass sich gewisse Kategorien über einen Zeitraum hinweg gleichartig entwickeln können. Für die Fernerkundung heisst dies, dass sie zumindest während dieser Zeitperiode nicht unterscheidbar sind. Betrachten wir aber die Entwicklung zu einem späteren Zeitpunkt der gleichen Wachstumsperiode, können wir feststellen, dass z.B. zwei Feldfrüchte zu verschiedenen Zeiten reifen, also von ihrem Aspekt her trennbar sind.

Um möglichst viele, oder im Idealfall alle vorhandenen Kategorien zu kartieren, müssen spektrale Informationen mindestens über die ganze, gemeinsame Vegetationsperiode hinweg untersucht werden. Datensätze, die spektrale Messungen (multispektral) von Objekten auch noch zu verschiedenen Zeiten enthalten, nennt man multivariate Datensätze. Die vorliegende Arbeit setzt sich mit Methoden zur Herstellung und Auswertung solcher Datensätze auseinander. Voraussetzung für eine

multitemporale oder multisaisonale Untersuchung ist eine periodische Befliegung des Testgebietes. Die Landsat-Satellitengeneration erfüllt diese Bedingung.

Wichtigste Aufgabe der Arbeit ist es, zeitlich verschiedene Satellitenbilder, vom gleichen Geländeausschnitt, genau zu überlagern (registrieren). Die Bilddaten sollen dabei einander zuerst geometrisch angepasst, und danach digital überlagert werden. Die Bildpunkte (Messdaten) eines Objektes (landwirtschaftlich bebautes Feld) von verschiedenen Satellitendurchgängen sollten deckungsgleich übereinander liegen, d.h. für eine digitale Verarbeitung schnell zugriffsbereit sein. In der nachfolgenden Klassifikation wird versucht, mittels verschiedener Algorithmen die Daten den vorgängig definierten Kategorien zuzuordnen. Anhand einer Feldaufnahme wird das Resultat überprüft und beurteilt. Es soll auch abgeschätzt werden, welche spektralen Kanäle aus der Zeitreihe der uns zur Verfügung stehenden Aufnahmen zuverlässige Kartierungen ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit wird der erste Teil den theoretischen Voraussetzungen gewidmet. Es wird auf die Möglichkeiten, aber auch auf die Grenzen der Erfassung der Landnutzung mit Fernerkundungsmethoden eingegangen. Insbesondere wird auf die Schwierigkeiten hingewiesen, allen sekundären Einflüssen, wie die der Atmosphäre, der Bodenqualität oder der Exposition u.a.m., gerecht zu werden. In diesem Teil wird auch auf die Verarbeitung, mit besonderer Berücksichtigung der Bildregistrierung und die Klassifikation hingewiesen.

Der zweite, praktische Teil dieser Arbeit gliedert sich in die Abschnitte Bildregistrierung, Diskussion der Klassifikationsresultate und Darstellung von Rasterdaten. Im Abschnitt der Bildregistrierung, dem Schwerpunkt der Arbeit zur Herstellung eines multitemporalen Datensatzes, werden drei Methoden vorgestellt, getestet und beurteilt. Es sind:

- Passpunktmethode
- Visuelle Differenzbildanalyse
- Digitale Bildkorrelation.

Der aus Überlagerungen zeitlich verschiedener Aufnahmen des gleichen Gebietes resultierende Datensatz wird dann mit drei verschiedenen Klassifikationsalgorithmen auf die Trennbarkeit in die vorher definierten Landnutzungskategorien hin untersucht. Es sind die Klassifikatoren der schrittweisen, linearen Diskriminanzanalyse, der Zentroid-Methode und der maximalen Mutmasslichkeit.

Im Anhang befinden sich die farbigen Reproduktionen der fünf für die multitemporale Verarbeitung verwendeten Landsat-Bildausschnitte, ferner das Resultat einer Klassierung und die Bodenkontrolle, sowie zwei Darstellungen von Hauptkomponenten bezüglich des Variablenraumes.

THEORETISCHER TEIL

A. FERNERKUNDUNG UND LANDNUTZUNG

Unter Fernerkundung (remote sensing) verstehen wir im weitesten Sinn die Messung von Eigenschaften eines bestimmten Objektes mit einem Instrument, das nicht in direktem physikalischen Kontakt mit dem Objekt steht (OSTERHEIDER und STEINER 1978). Zu einem Fernerkundungssystem gehört ein Sensor (Fotokammer, Abtaster) auf einer Plattform (Flugzeug, Satellit), der die Erdoberfläche fotografiert oder punkt- und zeilenweise abtastet. Die Auswertung erfolgt in der Regel analog auf einem fotografischen Produkt oder digital, indem die diskreten Messwerte des Abtasters einem Rechner zur Klassierung zugeführt werden. Erfolgt die Registrierung in verschiedenen Bereichen oder Bändern des elektromagnetischen Spektrums simultan, spricht man von Multispektral-Scanner (MSS) resp. von Multispektralaufnahmen.

Der grosse Vorteil der Fernerkundung mit multispektralen Abtastgeräten liegt darin, dass die Datenaufnahme flächenhaft erfolgt. Vom Flugzeug oder Satelliten aus wird das überflogene Gebiet zeilenweise abgetastet. Die Wahl der Empfindlichkeitsbereiche der Sensoren im Aufnahmegerät hängt stark von der Fragestellung und von den auf der Erdoberfläche zu identifizierenden Objekten ab. Aus dem Datenstrom kann das erfasste Gebiet wieder bildmässig rekonstruiert werden. Die Auswertung erfolgt also mittels eines Bildproduktes (Fotografie, Graudruck) durch den Interpreten. Im Gegensatz zu dieser analogen Arbeitsweise können die Bilddaten auch direkt dem Grossrechner zugeführt werden. Aufgrund statistischer oder deterministischer Kriterien werden die Einzelmessungen oder Bildpunkte (pixel) definierten Kategorien zugeordnet. Solche Verfahren sind Gegenstand der digitalen Bildverarbeitung (Kap. E).

Es sind vor allem vier Problemkreise in der Landnutzung, die mit Methoden der Fernerkundung anzugehen versucht werden:

- Landnutzungskartierung: Karten die den vorwiegenden Nutzungstyp wiedergeben (BOESCH et al. 1971)
- Landnutzungsinventur: sie erfasst die flächenmässigen Anteile der einzelnen Anbauprodukte
- Erntevorhersagen: eine Inventur, die die Anbauflächen bereits in einem frühen Wachstumsstadium erfasst und den zu erwartenden Ertrag mit zusätzlichen Parametern abzuschätzen versucht
- Überwachung des angebauten Gebietes: sie dient der Früherkennung von Schädlingsbefall oder Austrocknung.

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, eine detaillierte Landnutzungskartierung mit Satellitendaten durchzuführen. Dabei soll auch versucht werden, der Flächenanteil von Anbauprodukten zu bestimmen. Nach der obigen Definition können wir also auch von einer Landnutzungsinventur sprechen.

1. DAS REFLEXIONSVERHALTEN DER VEGETATION

Die Fernerkundung basiert auf der Tatsache, dass sich verschiedenartige Objekte, so auch Landnutzungstypen, durch ihr unterschiedliches spektrales Verhalten identifizieren lassen. Auf die technischen Aspekte dieses Verhaltens soll hier kurz eingegangen werden.

Alle Objekte auf der Erdoberfläche reflektieren, emittieren oder transmittieren einen Teil der auf sie einwirkenden elektromagnetischen Energie. Diese Energie stammt direkt oder indirekt von der Sonne. (Eine Ausnahme bilden die aktiven Fernerkundungssysteme mit Mikrowellen.) Die Reflexion und Emission erfolgt nur in bestimmten Bereichen des Spektrums. Die Intensitäten in den verschiedenen Wellenlängenbereichen sind messbar. Gleiche Objekte verhalten sich dabei ähnlich. Aus dem statistischen Verhalten solcher Messungen ermittelt man typische relative Reflexionskurven (Fig. 1).

1.1. Messen der Reflexion

Nach Definition ist die relative Reflexion der Quotient aus der reflektierten und der einfallenden Strahlung (über den Halbraum gemessen). Punktweise kann die zurückgeworfene Energie mit einem Breitband-Spektrometer gemessen werden (STEINER 1960). Dieses Instrument integriert die einfallende Energie über die ganze Messfläche und über den ganzen Bereich des sichtbaren Lichtes. Mit einem Schmalband-Spektrometer, beispielsweise dem EXOTECH 100-A von Exotech Incorp. (STAENZ 1976) wird das reflektierte Licht in 4 Spektralbereichen gemessen. Diese vier Bereiche entsprechen den Landsat-MSS-Kanälen (Kap. A.4.)

In der Natur gibt es keine Objekte, die nur gerichtet oder nur diffus reflektieren. Deshalb ist nicht nur die Richtung der einfallenden Strahlung sondern auch der Winkel, unter dem die

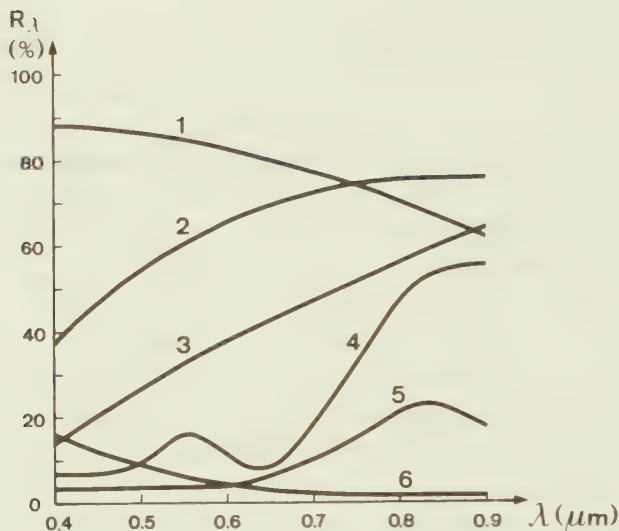


Fig. 1: Spektrales Reflexionsverhalten einiger Objekte:
1 Neuschnee, 2 Kalkstein, 3 reifes Getreide,
4 Laubwald im Sommer und grüne Wiese,
5 Ackerboden, 6 Wasser
(nach HAEFNER 1965)

reflektierte Energie gemessen wird, von Bedeutung. Der vom Instrument erfasste Ausschnitt hängt vom Öffnungswinkel und von der Distanz des Sensors zum Objekt ab. Die erfasste Strahlung wird dabei über die ganze Messfläche integriert. Innerhalb dieser Fläche verschwinden alle Texturen; sie entspricht dem Auflösungsvermögen des Spektrometers.

Was ein Spektrometer durch seinen schmalen Öffnungswinkel in vielen elektro-optischen Messungen abtastet, erfasst der fotografische Film in der Kamera flächenhaft. Analysen der Landnutzung auf Luftbildern verschiedener Filmarten, wie Ultraviolettfilm, Infrarot-Schwarzweissfilm, panchromatischer Film, Farb- und Falschfarbenfilm sind unter vielen anderen von STEINER (1960), MAURER (1965) und BAUMBERGER (1969) durchgeführt worden. Die quantitativen Aussagen dieser Arbeiten beruhen auf Messungen am Film mit einem Densitometer

oder Mikrodensitometer.

Elektro-optische oder elektronische Abtaster haben ein Signal am Ausgang, das der Integralmessung eines Bildelementes (picture cell, pixel) am Boden entspricht. Es ist abhängig vom Öffnungswinkel (IFOV, instantaneous field of view) der Sensorenoptik resp. der Antennenkonstruktion (Mikrowellen) und der Flughöhe (NUESCH 1977). Pionierarbeit auf dem Gebiet der multispektralen Fernerkundung leistete vor allem die Gruppe am Laboratory for Agricultural Remote Sensing (LARS 1967). ITTEN (1973) untersuchte mit einem IR-Thermalscanner vom Flugzeug aus das Verhalten der Vegetation. BINZEGGER (1976) und GFELLER (1976) werteten Landsat MSS-Daten für Landnutzungs- resp. Schneekartierungen aus. Multispektrale Scanner-Aufnahmen aus dem Flugzeug hat NUESCH (1977) für eine Landnutzungsinterpretation benutzt.

Nach dieser Übersicht der Möglichkeiten, Objekte durch Fernerkundung zu erfassen, soll auf eine wichtige Erweiterung der Unterscheidungskriterien eingegangen werden: das spektrale Verhalten in der Zeit.

2. MULTITEMPORALE AUSWERTUNG VON FERNERKUNDUNGSDATEN

Im folgenden soll auf die Vorteile eingegangen werden, die das Betrachten, resp. Auswerten einer Zeitreihe von fernerkundlichen Aufnahmen inbezug auf Unterscheidungskriterien von Landnutzungstypen mit sich bringt.

Viele Untersuchungen (u.a. STEINER 1960) der Landnutzung mit Fernerkundungsmethoden zeigen, dass die Wahl des Aufnahmezeitpunktes für eine optimale Unterscheidung der Nutzungsarten entscheidend ist (Fig. 2). Häufig kann aber aus meteorologischen oder organisatorischen Gründen der Aufnahme-Zeitplan nicht eingehalten werden. Verschiedene

Autoren haben versucht durch vergleichendes Auswerten mehrerer Überflüge derselben Vegetationsperiode (multisaisonale oder allgemein multitemporale Auswertung) die Interpretation zu verbessern. STEINER (1960) hält für panchromatische Luftbilder des schweizerischen Mittellandes die Zeit um Mitte Mai als die geeignetste. Er unterscheidet mehrere Trennstufen (z.B. Trennung von Getreide und Hackfrüchten oder Unterscheidbarkeitskriterien innerhalb des Getreides). Er wertet sie nach Grauton, Textur, Stereoeffekt und einer Kombination dieser Merkmale aus. Bezogen auf ein phänologisches Standardschema lassen sich Getreide und Hackfrüchte Mitte Mai bis Anfang Juni und Mitte Juli trennen. Kartoffeln und Runkelrüben werden am besten in der zweiten Hälfte September gesondert erfasst. Diese willkürlich herausgegriffenen Beispiele sollen illustrieren, wie wichtig der saisonale Aspekt einer Landnutzungsinterpretation ist.

BAUMBERGER (1969) hatte nur je eine Aufnahme im Juni und Juli zur Verfügung, jedoch in vier verschiedenen Filmarten. Bei der Interpretation der Luftbilder wurden mit der Filmkombination "nur Juli" 68% der Felder richtig klassiert. Juni und Juli-Bild kombiniert verbesserten das Resultat auf 92%.

Die digitale Auswertung von fotografischen Aufnahmen (u.a. BAUMBERGER 1969) hat den Nachteil, dass die Information auf dem Film zuerst digitalisiert werden muss. Der Film wird elektro-optisch abgetastet und über einen analog/digital Wandler in computergerechte Form gebracht. Die Beleuchtungsverteilung in der Bildebene und allfällige Verzerrungen der Bildgeometrie müssen bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Abtastsysteme wie M2S (11-Kanal-Abtaster von BENDIX Corp.) in Flugzeugen montiert (NUESCH 1977), oder wie MSS von Skylab (MURI 1980) und Landsat liefern die Daten direkt in einer Matrixform von diskreten (digitalen) Werten. Mit Abtastgeräten können auch Spektralbereiche erfasst werden, die ausserhalb der sichtbaren Strahlung liegen. Die Aufnahmesysteme bedürfen

keiner direkten Wartung und sind deshalb in unbemannten Satelliten einsetzbar.

Wichtigste Voraussetzung für die Verwendung multitemporaler Methoden sind Abtastsysteme, die regelmässig in kürzeren zeitlichen Abständen (Tage bis Wochen) und unter gleichen technischen Bedingungen kostengünstige Daten liefern. Flugzeuge sind meist nicht operationell einsetzbar. Unvergleichlich viel günstiger sind Satelliten, vor allem wenn die Entwicklungskosten nicht auf den Datenbezüger abgewälzt werden. Seit dem Start der Landsat-Generation sind diese Bedingungen erfüllt (Kap. A.4.).

Die Kanäle eines multitemporalen Datensatzes sind spektral nur bedingt verschieden, da im allgemeinen die Messungen im gleichen Spektralbereich zeitlich verschoben wiederholt werden. In der vorliegenden Arbeit werden die 4 Landsat-Kanäle von 5 Überflugstagen zu einem 20-Kanal-Bild zusammengefasst und ausgewertet. Es wurden bereits mehrere Arbeiten mit multisaisonalen Landsat-Daten ausgeführt. Als grösstes Projekt muss das LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment) gelten (ERICKSON 1979). Ziel ist ein weltweit einsetzbares System zur operationellen Erntevorhersage für Weizen. Beim LACIE wird eine multitemporale Auswertung mit Wetterbeobachtungen am Boden und von Wettersatelliten aus verbunden. Ferner werden Klimadaten und historische Ernteerträge von Weizen berücksichtigt. In Modellrechnungen wird in zwei Wachstumsstadien des Weizens versucht, die Weiterentwicklung abzuschätzen und eine Ertragsprognose zu machen.

WHELLER und MISRA (1976) erreichen mit der multisaisonalen Methode eine gute Trennung von "Weizen" und "Nicht-Weizen". KAUTH und THOMAS (1976) zeichnen das spektral-temporale Verhalten von Landnutzungskategorien anhand von Trajektorien auf (Kap. F.1.3.). Sie weisen insbesondere auf den Einfluss von Schatten und Bodenfarbe hin. MEGIER (1977) verwendet eine Kombination verschiedener Landsat-Bilder zur Kartierung von Pappel-Kulturen in der Po-Ebene.

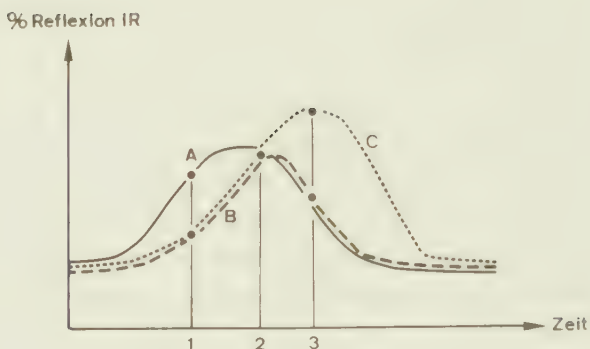


Fig. 2: Theoretische Reflexionskurve im IR von 3 Landnutzungs-kategorien in Abhängigkeit der Zeit (eine Vegetationsperiode).
 Zum Zeitpunkt 1 können anhand der Reflexionsmessung die Kategorien A von B und C unterschieden werden. Der Zeitpunkt 3 trennt C von A und B. Verarbeitet man die Messung vom Datum 1 und 3 gleichzeitig, können alle drei Kategorien erkannt werden.
 Die Messung zur Zeit 2 bringt keine zusätzliche Information.

Wie gezeigt wurde, erhöht eine zeitliche Betrachtungsweise der Vegetationsentwicklung ihre Differenzierungsmöglichkeiten wesentlich.

In der Folge wollen wir uns noch mit den sekundären Einflüssen auf Fernerkundungsdaten befassen, die die Trennbarkeit der verschiedenen Landnutzungskategorien beeinträchtigen können.

3. ZUR TRENNBARKEIT VON LANDNUTUNGSKATEGORIEN

Die unterschiedlichen Messwerte von zwei Landnutzungskategorien bewirken nur bedingt eine Trennung dieser Kategorien. Wie im Kap. E.3. gezeigt wird, kann beispielsweise die statistische Streuung die Trennbarkeit entscheidend verschlechtern. Auf folgende Gründe, die die Trennbarkeit beeinflussen, soll hier eingegangen werden:

- systembedingte Gründe
- Problem der Mischpixel
- Einfluss der Atmosphäre
- Streuung der Messwerte innerhalb einer Kategorie

3.1. Systembedingte Gründe

Zwei Nutzungstypen können nur dann getrennt erfasst werden, wenn ein Sensor empfindlich genug ist, wenigstens in einem der benutzten Spektralkanäle Unterschiede in der Intensität der reflektierten Strahlung festzustellen. Es bestehen zwei Möglichkeiten, zwei betrachtete Nutzungsarten trotzdem zu trennen: man sucht nach einem neuen, eventuell auch schmaleren Spektralbereich, oder man betrachtet die zwei Landnutzungstypen zu einem anderen Zeitpunkt während ihrer Wachstumsperiode. In der vorliegenden Arbeit haben wir die letztere Möglichkeit auszuschöpfen versucht.

3.2. Problem der Mischpixel

Das vom Sensor erfasste momentane Gesichtsfeld (IFOV) hat eine endliche Grösse und wird als eigentlicher Bildpunkt oder Bildelement (Pixel) abgebildet. Beim Abtasten entsteht im Übergangsbereich zwischen zwei Objekten (z.B. landwirtschaftliche Felder) ein Bildelement mit gemischter

Information (Fig. 3). Solche Misch- oder Randpixel werden dann vom Klassifikator nicht eindeutig, eventuell einer 3. Kategorie zugeordnet. Ihr Informationsgehalt ist schwierig zu deuten. Deshalb haben wir versucht solche Elemente mit einem Glättungsfilter im klassierten Bild zu eliminieren (Kap. E.5.).

3.3. Der Einfluss der Atmosphäre

In der vorliegenden Arbeit werden Landsat-Daten verarbeitet. Es werden deshalb vor allem die spektralen Eigenschaften dieser Daten bezüglich der Atmosphäre berücksichtigt.

Die Spektralbänder des MSS von Landsat vermögen Wolken nicht zu durchdringen. Was unter einer Wolke liegt, bleibt dem Sensor folglich verborgen. Objekte im Schatten einer Wolke erhalten nur diffuses Licht. Ihre Reflexionseigenschaften sind verschieden von gleichen, direkt beschienenen Objekten.

Auch eine wolkenfreie Atmosphäre beeinflusst die durchdringenden Strahlen in mannigfacher Weise. Die spektrale und flächenhafte Verteilung der reflektierten Strahlung eines Objektes wird verändert, die Strahlung des Objektes wird abgeschwächt und Fremdstrahlung in Form von Luftlicht (STAENZ 1978) wird hinzugefügt. Die vom Satelliten gemessene reflektierte Strahlung eines Objektes am Erdboden ist also nicht allein abhängig von den Reflexionseigenschaften dieses Objektes. Nach TURNER (1971) sind vor allem folgende Parameter für eine atmosphärische Korrektur von Multispektraldaten zu beachten:

- die Höhe des Sensors über der Messfläche
- der Winkel des Abtaststrahles von der Vertikalen
- das Azimut der Abtastrichtung
- der Zenitwinkel und das Azimut der Sonne

Die oben aufgeführten Parameter sind zudem abhängig vom

benutzten Spektralbereich. Diese Abhängigkeit besteht vor allem inbezug auf die Grösse und Verteilung der Dunstpartikel in der Atmosphäre.

Nach HENDERSON (1975) können die Unterschiede durch die Lage des Abtaststrahls zum Objekt und zur Sonne bei Landsat-Daten mehr als 18% (Weg der Strahlung durch die Atmosphäre) betragen und die totale Strahlung kann bis zu 10% variieren.

Um Landsat-Daten von verschiedenen Aufnahmetagen (oder aus verschiedenen Gebieten) direkt miteinander vergleichen zu können, sind atmosphärische Korrekturmodelle entwickelt worden (TURNER 1971, STAENZ 1978, u.a.m.). Ein besonders zu beachtendes Problem stellt dabei der unbekannte Anteil der Dunstmenge in der Atmosphäre dar. POTTER (1977) geht von den gemittelten tiefsten Messwerten im Kanal 4 jeder Abtastzeile eines Bildausschnittes aus, und definiert daraus den Einfluss des Dunstes. Der tiefste Reflexionswert muss allerdings durch Bodenmessung bekannt sein. Als tiefsten Wert zur Standardisierung von Landsat-Daten benützten AHERN et al. (1977) die Seen. HENDERSON (1975) macht zwei zeitlich verschiedene Datensätze desselben Gebietes vergleichbar durch Cluster-Algorithmen (Kap. E.1.). Es werden von beiden Datensätzen Cluster gebildet, nach der Stärke ihrer Streuung geordnet und in der entsprechenden Reihenfolge einander gleichgesetzt. STAENZ (1978) rechnet die Messwerte des Satelliten in relative Reflexionswerte um. Dazu schlägt er 3 Wege vor: 1. Vorgabe von 2 Referenzmessungen (Bodenmessung und entsprechender Videowert vom Satelliten), 2. eine Referenzmessung und noch Angabe über Transmissionsgrad und Globalstrahlung der Atmosphäre und 3. Eingabe des Transmissionsgrades, des Luftlichtes (path-radiance) und der Globalstrahlung. Die Modellrechnung erlaubt dann eine lineare Beziehung zwischen den Messwerten von Landsat und der relativen Reflexion der entsprechenden Messflächen (Pixel) herzustellen.

3.4. Streuung der Messwerte innerhalb einer Landnutzungskategorie

Die Ursachen für eine Streuung der Messwerte innerhalb einer Kategorie kann bei multitemporaler Auswertung durch die Bildgeometrie erklärt werden, oder verschiedene naturbedingte Ursachen haben.

3.4.1. Bildgeometrische Ursachen

Mit jedem Überflug des Satelliten wird ein bestimmtes Gebiet auf der Erde unter verschiedenen Aufnahmewinkeln (Kap. D) abgetastet. Zudem wird die Oberfläche jedesmal anders in Bildelemente aufgeteilt (Fig. 3). Da unsere landwirtschaftlichen Flächen nicht homogen sind, ergeben sich für das gleiche Feld auch verschiedene Messwerte.

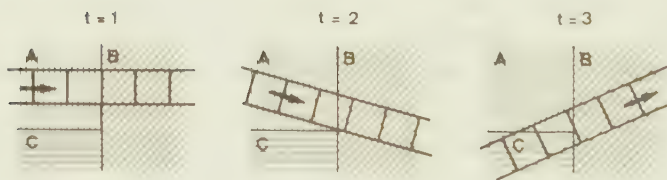


Fig. 3: Teil einer Abtastzeile mit Messflächen (Pixel) über demselben Ort, zu 3 verschiedenen Zeitpunkten:
t=1: Die Messfläche des Sensors fällt zufällig mit der Feldergrenze zusammen; es entsteht kein Mischpixel
t=2: Neben reinen Pixel in Feld A und B gibt es am Übergang von A zu B eine Mischsignatur
t=3: Eine der Messflächen enthält spektrale Information von den Felder A, B und C

3.4.2. Naturbedingte Ursachen

Eine Kartierung von landwirtschaftlich bebautem Gebiet mit Methoden der Fernerkundung setzt voraus, dass das Reflexionsverhalten einer bestimmten Kategorie über das ganze Untersuchungsgebiet räumlich und zeitlich vergleichbar bleibt. Mögliche Gründe für abweichendes Verhalten sollen in der Folge diskutiert werden.

3.4.2.1. Der Vegetationsbeginn

Der Beginn der Vegetationszeit ist, abgesehen von lokalklimatischen Einflüssen, eine Funktion der geographischen Breite und Höhe über dem Meer. Für 100 Meter Höhenzunahme verzögert sich der Vegetationsbeginn in der Schweiz um rund 4 Tage. Darüber hinaus verkürzt sich auf der Alpennordseite die Vegetationszeit pro 100 Meter Höhenzunahme um 7, auf der Alpensüdseite um 6 Tage (GENSLER 1946).

Für den Zeitpunkt der Aussaat im Frühjahr (resp. für Wintergetreide im Herbst) spielen Witterung, Organisation, aber auch ein traditionsgebundenes Verhalten des Bauern eine Rolle.

Eine Pflanzendecke kann erst erfasst werden, wenn sie einen bestimmten Prozentsatz der Bodenoberfläche (von oben betrachtet) bedeckt (Fig. 5). Dieses Verhältnis verändert sich zwischen dem Spriessen und der vollständigen Begrünung innerhalb von Wochen rasch. Zwei Maisfelder können - gleiche Bodenqualität und Düngung vorausgesetzt - durch die zeitbedingten Unterschiede der Aussaat an einem Stichtag in unterschiedlichem Wachstumsstadium angetroffen werden. Die Reflexionskurven (reflektierte Strahlung in Funktion der Zeit) verlaufen darum in der ersten Wachstumsphase zeitlich verschoben aber parallel. Später, im Reifestadium, kommen die Kurven dann mehr oder weniger zur Deckung.

Für die Unterscheidbarkeit verschiedener Landnutzungskategorien kommt dem Bedeckungsgrad des Bodens eine gewisse Bedeutung zu (Fig. 5). Im Monat Mai sind deshalb Mais und Kartoffeln von Getreide und Wiese gut trennbar. Bei geeignetem Aufnahmedatum erfasst man sogar wegen der differenzierten Blattbedeckung des Bodens die Unterschiede zwischen Sommer- und Wintergetreide. Erst grossräumige Untersuchungen können zeigen, welcher Informationsgewinn bei einer relativ hohen Aufnahmefrequenz in der ersten Wachstumsphase zu erwarten ist. Im Untersuchungsgebiet "Grosses Moos" (Kap. B) waren die beobachteten Unterschiede wegen der gestaffelten Aussaat von Mais besonders auffällig.

Während der Erntezeit des Getreides ändert sich die spektrale Zusammensetzung eines Feldes wieder abrupt. Bleibt aber, wie z.T. bei heutigen Bearbeitungsmethoden, das Stroh auf dem Feld liegen, wird der Erntezeitpunkt unter Umständen nicht richtig gedeutet. Häufig werden die Stoppelfelder sich selbst überlassen. Unkraut begrünt sie rasch wieder. Andere Felder werden nach der Ernte bald umgepflügt, auf anderen Klee gesät (Anblümen). Das spektrale Verhalten divergiert folglich auch nach dem Abernten stark. Um Fehlklassierungen zu vermindern, sollten Aufnahmen von abgeernteten Feldern nicht weiterverarbeitet werden.

Eher zyklisch erscheint das spektrale Verhalten von Mähwiesen. Im Frühjahr können blühender Löwenzahn und andere aspektbildende Blumen die grüne Farbe verändern. Eine gemähte Wiese kann zur Zeit der Aufnahme noch mit trocknendem Heu bedeckt sein, während auf der Nachbarwiese das Gras noch hoch steht. Die spektrale Signatur "Wiese" variiert unter Umständen also stark.

3.4.2.2. Veränderung durch den Windeinfluss

Streicht über ein Getreidefeld ein kräftiger, konstanter Wind oder wird ein solches Feld von Böen getroffen, hellt die Farbe auf. Nach GUPTA et al. (1971) reflektiert die dorsale Blattseite mehr Licht als die ventrale. Die Versuche von RAO et al. (1978) zeigen für Getreidefelder spektrale Abweichungen von 10 bis 20% von den Mittelwerten in dem Bereich zwischen 450 und 650nm. Die grössten Schwankungen traten bei 550nm auf. Auch eigene Messungen mit dem Spektrometer EXOTECH 100-A (Kap. D.1.3.) zeigten, dass die Messungen von einer Testfläche von einem Quadratmeter bodenbedeckenden Maises im IR-Kanal wegen Wind über 20% von einem mittleren Wert abweichen.

Auch bei Windwurf verändert sich die Signatur. Messungen von Feldern mit unterschiedlichem Anteil von Flächen mit liegenden Halmen, streuen stark.

3.4.2.3. Stress-Situationen der Pflanze

Durch den Befall von Insekten, Pilzen, Viren u.a.m., durch Trockenheit oder falsch verwendete Düngung erleidet eine Pflanze einen Wachstumsrückstand. Werden solche Stress-Situationen nicht überwunden, verändert sich die Blattstruktur. Das Blatt beginnt zu welken. In einem weiteren Stadium werden Pigmente ab- resp. umgebaut. Der Verfärbungsprozess ist je nach Spektralbereich verschieden stark ausgeprägt (Fig. 4).

3.4.2.4. Exposition und Sonneneinfallswinkel

STEINER et al. (1965) und weitere Autoren zeigen, dass beim Erfassen der relativen Reflexion senkrecht zur Geländeoberfläche und aus geringer Höhe der Sonneneinfallswinkel keine Rolle spielt. Landsat tastet die Erdoberfläche aber aus 920km Höhe mit einem Öffnungswinkel von

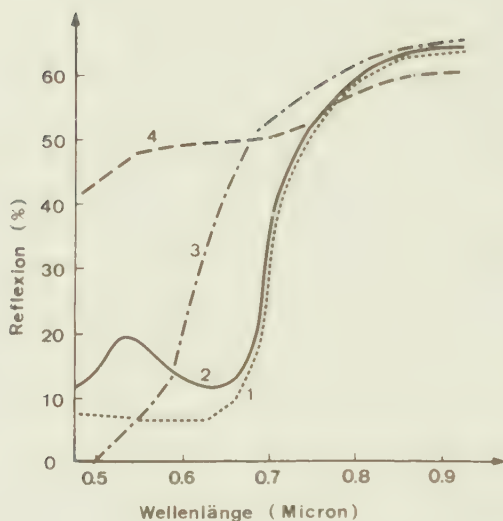


Fig. 4: Spektrale Reflexion (500nm bis 900nm) von 4 verschiedenen Pigmentzuständen von Buntnesselblättern (Coleus), nach MANUAL OF REMOTE SENSING, Vol. 2, (1975): 1 Blatteil mit rötlich-purpurnem Pigment, 2 grüner Blatteil, 3 roter Blatteil, 4 weisser Blatteil.

plus/minus 6 Grad vom Lot abweichend ab. Wegen der Distanz zwischen Objekt und Sensor muss bei Landsat-Daten die Atmosphäre berücksichtigt werden. Für ebenes Gelände sind die dadurch bedingten Reflexionsunterschiede nicht unbedingt vernachlässigbar (Kap. D.1.3.).

In kupiertem Gelände verändert sich die Reflexion drastisch, da nicht senkrecht zur Geländeoberfläche gemessen wird. STEINER (1965) gibt Abweichungen bis zu 100% für Weizen bei 55 Grad Neigung an, (was einem entsprechend steilen Hangwinkel gleichkommt) und einer Sonnenelevation von 33 Grad. Solche Steilhänge sind wirtschaftlich aber nicht mehr interessant, es sind nur noch Rasenbölder oder sehr steile Bergwälder. Gelände

Datum	Elevation (Grad)	Azimut
3. März	27	138
21. März	34	136
15. Mai	50	127
19. Juni	51	126
17. Juli	51	127
3. Aug.	48	128
18. Sept.	32	132

Tab. 1: Sonnenparameter während den Landsat-Überflüge des Testgebietes "Grosses Moos". Geographische Lage der Bildmittelpunkte in Tab. 4, Zeit zwischen 10.00 und 10.30 MEZ.

bis 20 Grad Neigung zeigen je nach Exposition bis zu 20% Reflexionsunterschied.

Es können verschiedene Methoden vorgeschlagen werden, um dieses Problem anzugehen:

- Bei der Auswertung wird die Hangneigung berücksichtigt. Für jeden Geländepunkt wird der Messwert je nach Exposition mit Erfahrungswerten korrigiert.
- Man erfasst statt der absoluten die relativen Werte durch präzises Überlagern von zeitlich verschiedenen Satellitenaufnahmen. In die Klassifikation werden jeweils nur die Beträge der Differenzen gleicher Messpunkte von Bildpaaren einbezogen.

3.4.2.5. Die Bodenfarbe

Nach dem "MANUAL OF REMOTE SENSING" (1975) ist für den Bereich zwischen 150 und 2500nm Wellenlänge eine Beeinflussung des Bodens auf Reflexionsmessungen der Vegetation zu erwarten. Es muss dabei vorausgesetzt werden, dass die blätterbedeckende Oberfläche der Vegetation kleiner als 100% ist (Fig. 5).

Um die Rauigkeit des Bodens und seinen Wassergehalt zu beurteilen, eignen sich unter bestimmten Bedingungen nur Mikrowellen (MEIER 1980). Im sichtbaren und infraroten Bereich verändert der Wassergehalt häufig die Bodenfarbe. Sie wird aber auch bestimmt durch das Verhältnis zwischen Siltgehalt und organischen Substanzen. Bei steigendem Siltgehalt des Bodens erhöht sich die Reflexion.

Nach OBUKHOV und ORLOV (1964) sind der rote und infrarote Spektralbereich besonders geeignet, Bodenqualitäten zu unterscheiden.

Fig. 9 zeigt das Testgebiet im panchromatischen Luftbild. Trotz fast vollständiger Bedeckung durch die Vegetation erkennt man alte Flussläufe, prähistorische Dünen und ehemalige Aushubgräben für die Drainage (Kap. B). Sie werden aber nicht nur durch die veränderte Bodenfarbe angezeigt, sondern auch durch örtlich unterschiedliche Wachstumsbedingungen.

Jede spektrale Messung einer Vegetationsdecke wird bei weniger als 100% Bodenbedeckung, Informationen des Bodensubstrates einschliessen. Um landwirtschaftliche Nutzungsarten spektral vergleichbar zu machen, sollte diese Bodeninformation kompensiert werden. CONDIT (1970) hat die Reflexion von verschiedenen Böden in den USA gemessen. Für viele Vegetationskartierungen mit Fernerkundungsmethoden fehlen leider, wie auch bei der vorliegenden Untersuchung, Angaben über das Reflexionsverhalten der Böden. Es wird deshalb vorgeschlagen, Satellitendaten von frischbestellten Äckern in

die Klassifikation miteinzubeziehen. Diese Information kann als gewichtetes Mass von den Messdaten entsprechender Felder mit bekannter oder geschätzter Bodenbedeckung subtrahiert werden. Die veränderte Bodenfarbe durch Feuchte etc. sollte man aber mitberücksichtigen.

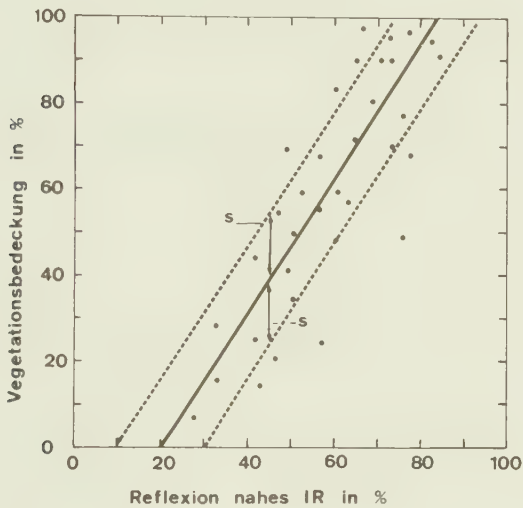


Fig. 5: Verhältnis der Bodenbedeckung durch Vegetation zur IR-Reflexion, gewonnen aus Luftbilder, Gila River Flood Plains, Arizona USA (Manual of Remote Sensing, Vol.2, 1975). s=Standardabweichung

In einer Auswertung von Fernerkundungsdaten müssten alle die oben aufgeführten Einflüsse auf die Messwerte berücksichtigt werden. Aus verschiedenen Gründen war es uns nicht immer möglich, dieser Forderung nachzukommen. Einige seien hier aufgeführt: Ein Atmosphärenkorrekturprogramm stand uns nicht zur Verfügung. Wir begnügten uns mit einer groben Abschätzung der Einflüsse der Atmosphäre durch Beobachtungen und Messungen und stellten so bei fast allen Überflügen einen vergleichbaren Zustand der Atmosphäre fest (Kap. D). Die spektralen

Eigenschaften der Ackerböden sind uns auch nicht bekannt. Wir behelfen uns mit einer Auswahl von Stichproben von Felder gleicher Nutzungskategorie aber verschiedener Bodenqualität.

4. DER LANDSAT UND SEIN MSS-SYSTEM

Die im praktischen Teil der Arbeit beschriebene Untersuchung ist mit Landsat-Daten ausgeführt worden. An dieser Stelle wird diese Generation von Erderkundungssatelliten vorgestellt.

Das MSS-System (multispectral scanner) soll kurz erläutert werden. Einen breiteren Raum nimmt die Diskussion der geometrischen Vorverarbeitung der Daten durch die Satellitenempfangsstation ein. In unserer Untersuchung wird eine Bildregistrierung ausgeführt, es werden 5 Bildausschnitte zu einem multitemporalen Datensatz zusammengefügt. Die geometrischen Gegebenheiten von Landsat sind deshalb wichtig.

Die NASA hat drei für den zivilen Gebrauch bestimmte Erderkundungssatelliten mit Erfolg gestartet:

- Landsat-1 am 23.Juli 1972, abgeschaltet
am 6.Januar 1975
- Landsat-2 am 22.Januar 1975, abgeschaltet
am 22.Januar 1980
- Landsat-3 am 5.März 1978

4.1. Technische Daten von Landsat

Für die technischen Spezifikationen sei auf das "Landsat Data User Handbook" (NASA 1972) hingewiesen. Rekapituliert werden hier nur die wichtigsten technischen Angaben (Tab. 2 und 3). Von den beiden an Bord mitgeführten Aufnahmesystemen hat sich

Apogee - Apogäum	917 km
Perigee - Perigäum	898 km
Inclination - Neigung	99.0 grad
Anomalistic period - Umlaufzeit	103 min
Eccentricity - Exzentrizität	0.0012
Local time at equatorial crossing - Ortszeit beim Überqueren des Äquators	9:30
Coverage cycle duration - Dauer des Bedeckungszyklus	18 Tage
Distance between adjacent ground tracks - Abstand benachbarter Aufnahmestreifen	159.38 km

Tab. 2: Bahnparameter der Erderkundungssatelliten
Landsat (NASA 1972)

der Multispektral-Scanner (MSS) als besonders zuverlässig erwiesen (Fig. 6). Das andere System, eine panchromatische Fernsehkamera (Return Beam Vidicon - RBV), hat sich nur bei Landsat-3 bewährt. Dieses Aufnahmesystem liefert Bilder mit 40x40 m² Bodenauflösung. Man erhofft sich aus der Verbindung beider Aufnahmesysteme eine bessere Bildqualität. Uns stehen bislang keine RBV-Digital-Daten zur Verfügung.

Wie Tab. 3 zeigt, hat der MSS vier Spektralkanäle. Band oder Kanal 4 liegt zwischen Grün und Orange, Band 5 zwischen Orange und Rot, Band 6 ist rot- und nahes infrarot- empfindlich; Band 7 reagiert auf nahes IR.

Seit 1976 betreibt die Fa. TELESPIAZIO eine Empfangsstation auf der Hochebene von Fucino bei Rom. Sie empfängt im Auftrag der ESA (European Space Agency) Landsat-Daten von Mittel- und Südeuropa und von Nordafrika. Die genaue Beschreibung des Formats der vom TIPS (TELESPIAZIO Image Processing System) vertriebenen Digitaldaten ist in der Dokumentation "Format Specifications for Landsat MSS System", TELESPIAZIO (1976) nachzulesen. Die in dieser Arbeit benützen Magnetbänder (computer compatible tape, CCT) wurden alle von TELESPIAZIO aufbereitet.

Momentaner Öffnungswinkel des Detektors	0.086 mrad
entsprechende Fläche auf der Erdoberfläche	6240 m ²
Wippspiegelbereich	+/-2.89 grad
Wippspiegelfrequenz	13.62 Hz
Anzahl Scan-Linien pro Wippspiegelbewegung	6
Breite des Aufnahmestreifens	185 km
Zeitintervall für Messwertnahme	9.95 µs
Spektralbereiche: Band 4: 0.5-0.6 µm - Band 5: 0.6-0.7 µm	
Band 6: 0.7-0.8 µm - Band 7: 0.8-1.1 µm	
Anzahl Detektoren	24
Auflösung der Messwerte	6 bits
Messwerte pro Abtastlinie	3240
Abtastlinien pro Bild und pro Band	2340
Informationsmenge pro Szene	30.4 Mbytes

Tab. 3: Technische Daten des Multispektral-Scanners
(NASA 1972)

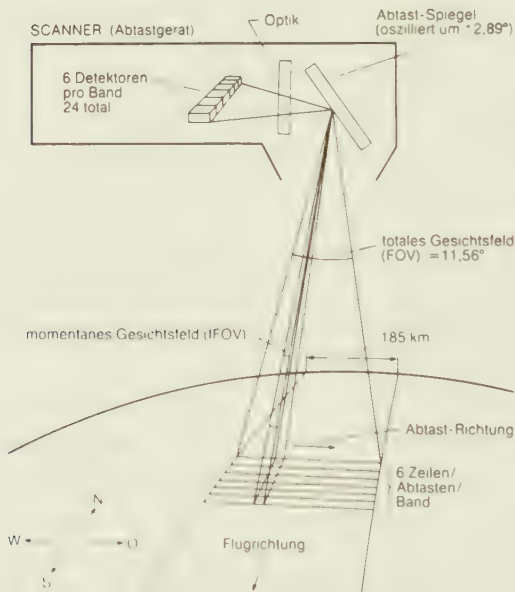


Fig. 6: Das Landsat Multispektralscanner-System
(NASA 1972)

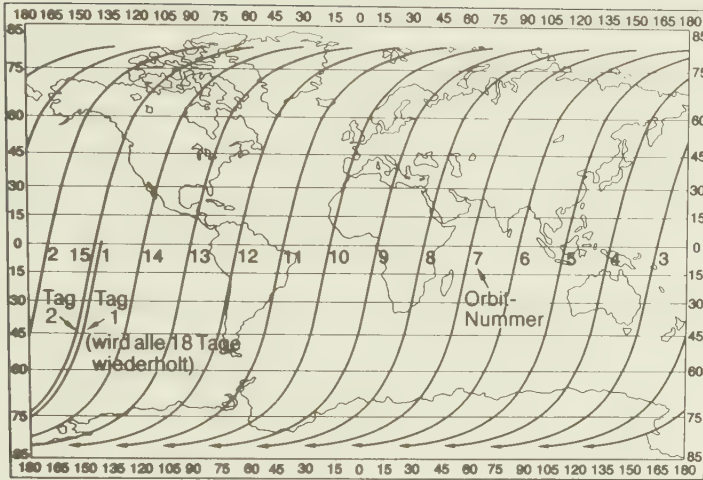


Fig. 7: Typische Umlaufbahnen der Landsat-Satelliten
(NASA 1972)

4.2. Vorverarbeitung der Daten

In einer Vorverarbeitungsstufe werden vom TIPS verschiedene geometrische und radiometrische Korrekturen durchgeführt. Die ausgelieferten Magnetbänder tragen dann die Bezeichnung "full geometric and radiometric corrections (product-quality C)". Geometrisch korrigiert werden (TELESPAZIO 1976):

- Die nichtlineare Wippspiegelbewegung.
- Die panoramische Verzerrung: die Erdkrümmung wird berücksichtigt.
- Die unterschiedliche Flughöhe zwischen verschiedenen Bildern (Frames): die Korrektur erfolgt relativ zum Bildmittelpunkt jedes Bildes.
- Die Lage des Satelliten: Fluglageveränderungen treten durch Rollen (rolling), Nicken (pitching) und Gieren (yawing) auf. Der aus diesen Bewegungen in drei Dimensionen von der Senkrechten (gegen den Erdmittelpunkt gerichteten) abweichende Winkel wird im Bildmittelpunkt bestimmt. Die Korrektur erfolgt relativ zu dieser Messung für das ganze Bild. Die Änderung des Winkels beträgt weniger als 0.015 Grad pro Sekunde. Die Aufnahmedauer eines Bildes beträgt ca. 28.6 Sekunden. Im ungünstigsten Fall muss man folglich zwischen Bildanfang und Bildende mit einem Fehler vom 3.4 km rechnen.

Einige Korrekturen sind bei den Bildern von 1976 nicht gemacht worden. Es wird aber erwartet, dass die telemetrischen Daten von Landsat in Fucino ab Mitte 1980 interpretiert werden können und zur geometrischen Korrektur eingesetzt werden (Mitteilung von De Agostini, TELESPIAZIO). Noch vorhandene Restfehler können z.B. durch Kontrollpunkte auf der Erde korrigiert werden.

- Der "image-skew": die Versetzung der Abtastlinien westwärts infolge der Erdrotation.
- Der "scan-skew": das Versetzen der einzelnen Abtastzeilen in Flugrichtung des Satelliten während der Abtastzeit.
- Die zeitlich unterschiedliche Aufnahme gleicher Bildpunkte in den verschiedenen Kanälen: die Korrektur erfolgt beim Formatieren der Daten.
- Unterschiede in der Umlaufgeschwindigkeit des Satelliten.

Nach der erwähnten TELESPIAZIO-Dokumentation sind die Restfehler (von maximal 3.4 km) auf nicht systematisch erfassbare Lageänderungen des Satelliten innerhalb eines Bildes zurückzuführen. Wichtig ist aber zu wissen, dass der geometrische Ausgleich durch Einfügen resp. Auslassen von Bildelementen (pixels) erfolgt. Diese Korrektur wird im TIPS zeilenweise und innerhalb jeder Zeile pixelweise gemacht. Ein von uns durchgeführtes Spiegelexperiment deckte aber maximale Abweichungen von plus/minus 1.5 Pixel innerhalb weniger als hundert Bildelementen auf (Kap. C.1.1.).

Radiometrische Korrekturen sind hier als radiometrische Kalibrierungen zu verstehen. Sie basieren auf statistischen Methoden (Landsat-1) oder auf Vergleich mit dem Graukeil, der an Bord des Satelliten nach jeder Abtastzeile erzeugt wird (Landsat-2 und Landsat-3). Die Verfahren werden für alle 24 Detektoren (Fig. 6) einzeln ausgeführt. Die rekonstruierten Bilder zeigen, dass die Verfahren vor allem im tieferen Wertebereich nicht die gewünschte Wirkung haben; die Streifenbildung (banding) ist in homogenen Flächen, wie z.B. bei Seen, noch deutlich sichtbar, also ungenügend kompensiert.

Nach der Vorstellung des Aufnahmesystems soll nun auf die Verarbeitung der Daten eingegangen werden. Im folgenden

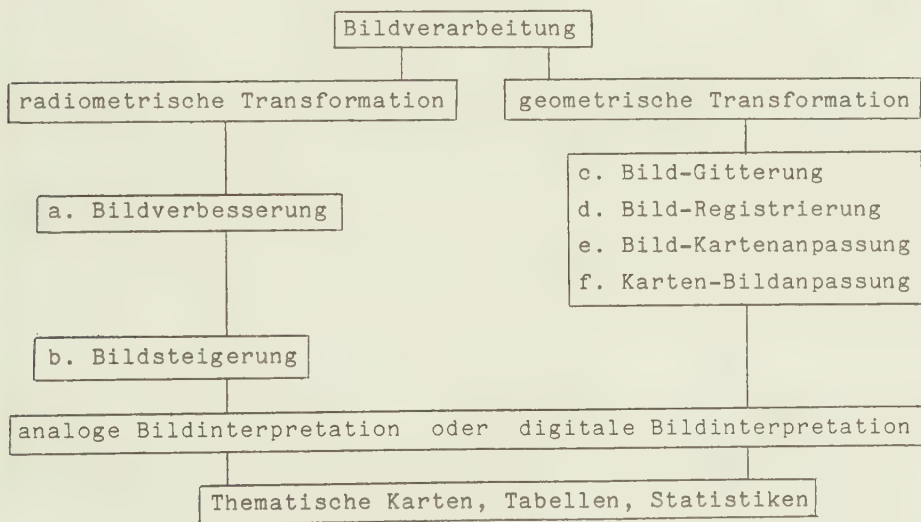
Kapitel werden die theoretischen Voraussetzungen für die Verarbeitung von multispektral erfassten Aufnahmen behandelt. Aufgrund der durchzuführenden Untersuchung interessiert man sich vor allem für die Bildanpassung (Bildüberlagerung oder Bildregistrierung) und für die Klassifikation von Multispektraldaten.

5. DIE VERARBEITUNG VON MULTISPEKTRALDATEN

Nach der Beschreibung der Datenaufnahme und der Diskussion über die möglichen Einflüsse auf das spektrale Verhalten von landwirtschaftlichen Nutzungseinheiten, soll nun auf die digitale Verarbeitung von Fernerkundungsdaten eingegangen werden.

Im folgenden Schema sind einige der Wege aufgezeichnet, nach denen Bilder verarbeitet und interpretiert werden können. Die einzelnen Ausdrücke werden weiter unten ausführlicher erklärt.

Eine gute Zusammenfassung der Möglichkeiten und Grenzen der digitalen Bildverarbeitung gibt DORRER (1977).



5.1. Radiometrische Transformationen

Bei radiometrischen Korrekturen wird der Messwert verändert. Man unterscheidet zwischen atmosphärischen und systembedingten Korrekturen und solchen, die den Bildinhalt allgemein verbessern. Der Einfluss der Atmosphäre kann über ein Modell oder aufgrund von Referenzmessungen am Boden erfasst werden. Damit wird es möglich, relative oder absolute Messwerte innerhalb eines Bildes mit inhomogenen Luftschichten oder zwischen zwei Bildern zu vergleichen (HENDERSON 1975, STAENZ 1976). Die gegenseitige Beeinflussung der Messwerte durch Überstrahlung hat OTTERMAN (1978) untersucht.

a. Die Bildverbesserung kompensiert systembedingte Aufnahmefehler. Beim Landsat wird zu diesem Zweck nach jeder Abtastzeile ein Graukeil von einer bordinternen Lichtquelle aufgenommen. Auf diese Weise wird das Videosignal geeicht.

b. Bildsteigerungen können erzielt werden durch Neusetzen der Messwerte (Dehnung oder Stauchung in bestimmten Messwertebereichen). Durch Festlegen von Schwellenwerten (Tontrennung) werden Elemente herausgehoben; so lassen sich Formen besser erkennen. Weitere Verfahren dienen der bildmässigen Verstärkung der Kanten oder verfolgen und vervollständigen linienhafte Bildteile.

5.2. Geometrische Transformationen

Je nach Fragestellung können geometrische Transformationen verschieden erfolgen (OSTERHEIDER und STEINER 1978):

c. Mit der Bild-Gitterung (image gridding oder image graphing) wird das Bild nicht korrigiert, sondern ein Kartenkoordinatennetz wird verzerrt und dem Bild angepasst. Die Resultate einer Bildauswertung können mittels dieses Netzes auf die Karte übertragen werden.

d. Bei der Bild-Registrierung (image registration) werden Bilder durch geometrische Transformationen einem Referenzbild angepasst. Diese Methode wurde in der vorliegenden Arbeit angewandt.

e. Die Bild-Kartenanpassung erzeugt ein Bild in einer bestimmten Kartenprojektion (BERNSTEIN 1973, COLVOCORESSES et al. 1973, KRATKY 1974).

f. Bei der Karten-Bild-Anpassung wird die ganze Karteninformation unter Berücksichtigung der Karten- und Bildprojektion auf das Bild übertragen.

Für eine geometrische Anpassung werden häufig folgende Transformationen benutzt:

- affine Abbildung
- Polynomtransformation n-ten Grades.

Die digitale, geometrische Transformation kann vorwärts oder rückwärts erfolgen. Falls vorwärts transformiert wird, geht man von den Originalbildkoordinaten aus und berechnet die Bildkoordinaten des Zielbildes und sucht die Koordinaten mit dem dazugehörigen Wert im Originalbild. Grundsätzlich kann man dabei den Messwert belassen und nur die Bildkoordinaten neu bestimmen. Es ist aber auch möglich, zwischen den Messwerten zu interpolieren (BORIELLI et al. 1979).

5.3. Digitale Bildinterpretation

Das zentrale Problem in der Verarbeitung von multispektralen Datensätzen wird in diesem Kapitel umrissen: wie kann aus den Messdaten eines spektral erfassten Objekts dieses wieder identifiziert werden!

Unter digitaler Bildinterpretation, auch Mustererkennung genannt, versteht man im allgemeinen Methoden zur

Klassifikation multivariater Information (OSTERHEIDER und STEINER 1978). Das Muster ist ein Vektor, dessen Komponenten die Eigenschaften eines Merkmals wiedergeben. Die Merkmale sind in unserem Fall landwirtschaftliche Felder.

Ein Sensor erfasst Messwerte von Messflächen in verschiedenen Spektralbereichen, die Komponenten oder Variablen genannt werden. Wir unterscheiden zwei Methoden der Auswertung (ROSENFELD 1976):

- das Gruppierungs-Verfahren oder die nicht überwachte Klassifikation (cluster analysis)
- das Diskriminanz-Verfahren oder die überwachte Klassifikation (discriminant analysis by supervised learning).

Beim Gruppierungs-Verfahren oder auch Cluster-Analyse genannt, erfolgt die Zuordnung nach aufsteigender hierarchischer Abhängigkeit. Zu Beginn bildet jedes Element eine eigene Klasse, hier als Cluster bezeichnet. Aufgrund vorgegebener Kriterien, z.B. der Distanz, werden nun sukzessive Elemente zu neuen umfangreicheren Clustern oder Klumpen zusammengezogen. Die Anzahl der Cluster verkleinert sich im Laufe der Rechnung, bis nach endlichen Schritten alle Cluster zu einem einzigen zusammengeschmolzen sind. Nach Erreichen einer gewünschten Anzahl Cluster wird der Prozess aber abgebrochen. In einem weiteren Schritt ist es dann die oftmals schwierige Aufgabe des Interpretens, die gebildeten Cluster zu identifizieren, d.h. ihnen z.B. einen bestimmten Landnutzungstyp zuzuordnen.

Beim Diskriminanz-Verfahren wird eine bestimmte Anzahl Klassen oder Kategorien mit ihren Messwerten als Stichprobe vorgegeben. Die Klassierung wird dann aufgrund dieser Stichproben durchgeführt. Fig. 8 zeigt einige der möglichen Kriterien, nach der eine Klassierung gemacht werden kann.

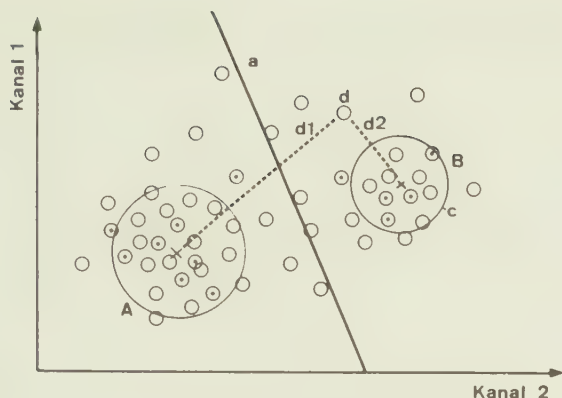


Fig. 8: Klassifikationskriterien im Variablenraum

- Elemente der Datenmenge
- ⊙ Stichproben von Klassen A und B
- a Trennfunktion zwischen A und B
- d_1, d_2 Distanzmass des Elementes d von den Zentren der Kategorien
- c Schranken für die Klassen A und B

Bei der überwachten Klassifikation wird in zwei Stufen vorgegangen:

- Trainieren (learning): Herauslesen der zu den Kategorien gehörenden Bilddaten (Stichproben) und deren statistische Auswertung.
- Zuordnen (classify): Die Zuordnung jedes zu klassierenden Pixels zu der Kategorie, zu der es am ehesten passt.

Im praktischen Teil dieser Arbeit haben wir mit folgenden Klassifikationsverfahren gearbeitet:

- die schrittweise, lineare Diskriminanz-Analyse
BMD7MT (DIXON 1975)
- das DCLASS, eine Zentroid-Methode
(BORDEN et al. 1975)
- das MCLASS, die maximale Mutmasslichkeit
(BENDIX 1974, FASLER 1978).

5.3.1. Zur schrittweisen, linearen Diskriminanz-Analyse

Zum Verständnis dieses Verfahrens ist die geometrische Vorstellung sehr geeignet: Im ersten Schritt (Trainieren) werden aufgrund des statistischen Verhaltens die Mittelpunkte der Kategorien im n-dimensionalen Variablenraum bestimmt. Jeder Variablen (Kanal) kommt dabei eine Dimension im Variablenraum zu. Im 2. Schritt wird jedes zu klassierende Pixel derjenigen Kategorie zugewiesen, zu deren Mittelpunkt im n-dimensionalen Raum es den kleinsten Abstand hat.

5.3.2. Zur Klassierung mit DCLASS und MCLASS

Das DCLASS ist eine Zentroid-Methode. Die Elemente werden, ähnlich dem BMD7MT, einer Kategorie aufgrund der kürzesten Distanz zu deren Zentrum zugeordnet. Diese Distanz kann durch Setzen von Schranken (thresholds) limitiert werden. Die Schranken entsprechen den Oberflächen von n-dimensionalen "Kugeln", die je eine Kategorie zum Inhalt haben (Fig. 8). Zentrum ist der jeweilige Kategorienmittelwert. Das Verfahren erlaubt, für jede Kategorie eine individuelle Limite zu setzen. Die Einschränkung erfolgt aber für alle Variablen einer Klasse mit einem einzigen Mass. Die Schranke wird anhand der Trenndistanzmatrix und der Standardabweichungen abgeschätzt.

Das MCLASS (FASLER 1978) basiert auf der maximalen

Mutmasslichkeit (maximum likelyhood). Die Zuordnung erfolgt aufgrund einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, die anhand der Stichproben für jede Klasse abgeschätzt wird. Ein unbekanntes Element wird derjenigen Klasse zugeordnet, für deren Auftreten an dieser Stelle im Variablenraum die grösste Wahrscheinlichkeit herrscht (NUESCH 1977). Durch Schranken kann auch der Wahrscheinlichkeitsraum eingeengt werden. Das Mass wird beim MCLASS in einem Vielfachen der Standardabweichung angegeben. Einerseits kann beim MCLASS der Multiplikator nur gesamthaft für alle Klassen gegeben werden, andererseits berücksichtigt er aber die Streuungen der Kategorien individuell.

5.3.3. Zur Stichprobengrösse

Für eine Klassifikation nach einem überwachten Verfahren benötigen wir Stichproben. Ihr Umfang soll kurz diskutiert werden.

Die erforderliche Menge Stichproben ist abhängig von der Anzahl der benutzten Variablen (Kanäle) und von der Zahl der zu berücksichtigenden Kategorien (TOUSSAINT 1977).

FOLEY (1977) und KANAL et al. (1977) befassen sich neben anderen mit dem Verhältnis der Anzahl Variablen zu der Stichprobenmenge und dem Quotienten von Stichproben zu Kategorien. Diese Arbeiten belegen, dass bei konstantem Stichprobenumfang trotz Erhöhung der Variablenzahl die Klassifikationsgüte ein Maximum erreicht und dann wieder absinkt. Die Experimente sind mit künstlichen, gaussverteilten Daten durchgeführt worden. Wie am praktischen Beispiel in dieser Arbeit gezeigt wird, konnte mit einem in einigen Fällen nahe bei 1 liegenden Variablen-zu-Stichproben-Verhältnis diese obere Sättigung der Klassifikationsgüte nicht erreicht werden.

B. DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET "GROSSES MOOS"

1. NATURGESCHICHTLICHER ABRISS

Das Grosse Moos, siedlungsfeindlich vom Mittelalter bis ins letzte Jahrhundert, ist erst mit den Juragewässerkorrekturen landwirtschaftlich bedeutend geworden. Lange Zeit war die baumlose, sumpfige Landschaft ein Herd für das Fieber, ein Allgemeingut, das höchstens als mageres Weideland und zur Heugewinnung taugte.

Die Senke nördlich des Neuenburger- und Murtensees und östlich des Bielersees (Fig. 10) umfasst mehr als 6000 Hektaren und bildete einen Teil des nacheiszeitlichen Jurasees. Sein Niveau lag rund 20 Meter höher als die heutigen Seespiegel. Mit dem Moränendurchbruch bei Solothurn senkte sich der Wasserspiegel unter das heutige Pegel. Das Gebiet bewaldete sich langsam. 2 Meter tief in mooriger Erde eingebettet fand man Eichenstämme, die vom Waldreichtum jener Zeit zeugen (LÜDI 1932, RAMSEYER 1952, BECKER 1972). Das Gesicht dieser Gegend wurde durch die Flüsse Aare und Suze immer wieder verändert. Letztere kommt aus dem Jura und mündet heute bei Biel in den See.

Die Aare wechselte wiederholt ihren Lauf, floss statt bei Aarberg nach Norden südwestwärts durch das Moos in den Neuenburgersee. Spuren dieser Altläufe sind im Luftbild (Fig. 9) bei der Domäne Bellechasse deutlich zu erkennen. Gerölle und Sande lagerten sich über den moorigen Boden ab.

Die Suze dämmte zeitweise den Ausfluss des Bielersees ab und floss statt in diesen nordwärts. Die Seespiegel der drei Jurarandseen stiegen. Die Dünenbildungen nördlich des Neuenburgersees sind weitere Zeugen von grossen Pegelschwankungen. Zwischen den heute noch erkennbaren hellen Sanddünen bildete sich Torf und dunkler, mooriger Boden. An



Fig. 9: Luftbild vom 3.Aug. 1976 0925h: südlicher Teil vom Grossen Moos (Aufnahme: Militärflugdienst Dübendorf)

anderen Stellen wandelte sich dieser Boden durch Wasserentzug und Austrocknung in anmoorigen Boden oder dunkle Lehme um.

2. DIE HEUTIGE BEWIRTSCHAFTUNG

Die beiden Juragewässerkorrekturen von 1868 bis 1891 und von 1962 bis 1973 veränderten die Bewirtschaftung grundlegend. Heute finden wir im Grossen Moos die grösste zusammenhängende, offene Ackerfläche der Schweiz (Atlas der Schweiz, Blatt 50).

Der erste Eingriff, noch im letzten Jahrhundert, regulierte die Aare durch den Bau des Hagneck-Kanals und des Nidau-Büren-Kanals. Ferner wurden Entwässerungskanäle erstellt und Drainage-Leitungen verlegt. Die Seespiegel senkte man um zwei Meter. Erneute Überschwemmungen und Torfsackungen machten Mitte dieses Jahrhundert eine zweite Korrektur nötig. Man verbreiterte im wesentlichen die Broye und den Zihlkanal. Seit 1971 wird das Drainage-System saniert und ausgebaut. Weitere Kanäle werden bis 1982 fertiggestellt sein. Sie dienen der Regulierung des Grundwasserspiegels, der durch Pumpstationen über die Kanäle ungefähr auf einem Meter Tiefe gehalten wird. Man hofft, dass dadurch die Torfsackungen verlangsamt werden.

Anfängliche Schwierigkeiten, den neugewonnenen, sehr humusreichen Boden zu bewirtschaften, konnten mit der Pionierarbeit auf der Domäne Witzwil und auch durch Erfahrungen aus Holland überwunden werden. Wald wurde als Windschutz aber auch zur Stabilisierung des verlandeten Bodens (Chablais) angelegt. Noch sind nicht alle Probleme gelöst. Die Grundwassersenkung verursacht durch Entzug des stützenden Wassers Sackungen des Torfes. Unbedeckte, schwarze Erde geht durch Oxidation verloren. Die Wirkung des Windes trägt ebenfalls zum Bodenschwund bei.

Um der Bodenerosion zu entgegnen, werden heute kurzfristig wieder Weideflächen geschaffen. Der Nutzungsgrad ist aber gering und eine grössere Milch- oder Fleischproduktion ist gesamtwirtschaftlich ungünstig. Langfristig erhofft man durch Tiefpflügen (Einmischen des darunterliegenden Sandes) oder durch Ausstreuen von Sand den Humusgehalt auf 10 bis 20% zu

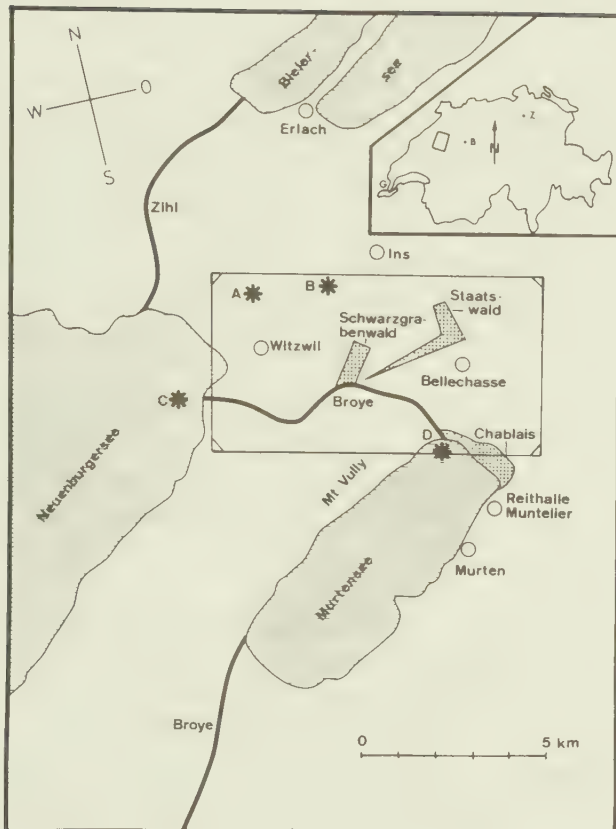


Fig. 10: Geographische Skizze des Untersuchungsgebietes "Grosses Moos". A bis D: Positionen der Spiegelreflektoren (Kap. C.1.)
Das Testgebiet ist eingerahmt

reduzieren. Ein weiteres Problem ist das Unkraut. Erst mit seiner chemischen Bekämpfung seit 1968 konnte Mais kultiviert werden. Im Jahr 1978 wurden davon allein auf der Domäne Witzwil 109 Hektaren angebaut (Mitteilung von Herrn Käser, Witzwil). Kleinbauern betreiben aus Kostengründen intensiven Gemüsebau, was aber dem Boden nicht unbedingt zuträglich ist (WAEBER 1979).

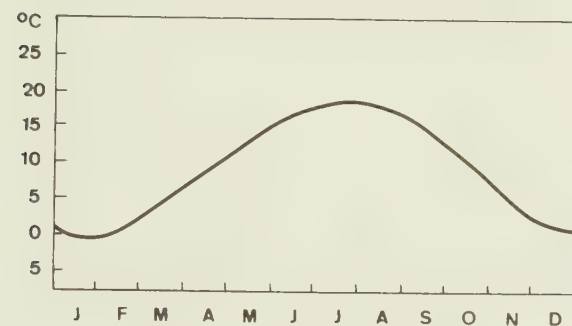
3. FERNERKUNDUNG IM "GROSSEN MOOS"

Das "Grosse Moos" ist eine weite, flache Ebene. Geometrisch und radiometrisch ist ein derartiges Gebiet für eine Erfassung mit Fernerkundungsverfahren günstig. Die feine, teilweise gartenartige Parzellierung verlangt aber, will man eine detaillierte Aufnahme machen, ein hohes, im Meterbereich liegendes Auflösungsvermögen des Sensors. Es fallen dadurch riesige Datenmengen an, deren Verarbeitung heute noch Probleme aufgibt.

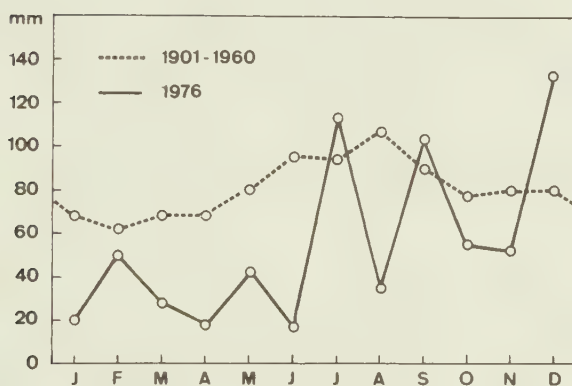
Wegen der relativ schlechten Auflösung unserer Landsat-Bilder von nur 79m x 79m, beschränkten wir uns auf eine Analyse der grossen Felder im südlichen Bereich des Moores. Es ist vornehmlich das Gebiet der Domänen Witzwil und Bellechasse (Fig. 10).

Reflexionsmessungen der Vegetation werden durch die unterschiedlichen Bodenfarben beeinflusst (Kap. A.3.4.2.5.). Im Grossen Moos finden wir recht verschiedene Bodenqualitäten, bedingt durch die Entwicklungsgeschichte der Gegend (Dünen, Moore, Altläufe von Flüssen etc.). Die heutige Bewirtschaftung (Tiefpflügen, Übersanden der Felder) beeinflusst die Bodenfarbe weiterhin. Um bei der Auswertung der Satellitenbild-Daten Falschklassierungen möglichst zu vermeiden, sind Stichproben von Feldern gleicher Nutzungskategorie aber verschiedener Bodenqualität erhoben worden (Kap. E.2.).

Klimatisch gehört das Gebiet zum Cfa-Klima (nach Klimaklassifikation Köppen). Der Jahresgang der Temperatur ist aus Fig. 11a ersichtlich. 1976 war hydrologisch ein Ausnahmejahr mit grosser Trockenheit im ersten Halbjahr (Fig. 11b). Durch starkes Austrocknen wird der Boden häufig heller (Kap. A.3.4.2.5.). Trockenheit kann aber auch zu Mangelerscheinungen der Pflanzen führen (Kap. F.1.1.).



a)



b)

Fig. 11: Einige klimatische Daten vom Grossen Moos und Umgebung:

- a): Jahresverlauf der Temperatur (gemittelte Tageswerte) von Neuenburg 1901-1970
- b): Monatliche Niederschlagswerte von Witzwil BE

PRAKTISCHER TEIL

C. DIE BILDREGISTRIERUNG

In unserer Untersuchung wurden 8 Landsat-Bilder bearbeitet (Tab. 4). Für eine multitemporale Untersuchung eigneten sich daraus 5 Bildausschnitte aus dem Jahr 1976. Die Aufnahmen liegen über die ganze Vegetationsperiode gut verteilt, zwischen den Monaten Mai und September. Die Bilder tragen hier die Bezeichnungen N1392, M1427, N2542, M2559 und N1518. Aus diesen Aufnahmen wurde der gleiche Geländeausschnitt zu einem multitemporalen Datensatz zusammengefügt. Weitere drei Aufnahmen dienten radiometrischen und geometrischen Vergleichen.

Kurzname	Identifikation	Frame	Datum	Kurs (Grad)	Bildmitte	
					N	E
N1392	E-1392-09124	211-27	15/5/76	194.99	47-19	6-34
M1427	E-1427-09043	210-27	19/6/76	195.91	47-19	7-51
N1428	E-1428-09100	211-27	20/6/76	194.86	47-19	6-26
N2542	E-2542-09370	211-27	17/7/76	195.25	47-19	6-42
M2559	E-2559-09305	210-27	03/8/76	196.28	47-19	8-08
N1518	E-1518-09024	211-27	18/9/76	194.99	47-19	6-36
M2901	E-2901-09163	210-27	11/7/77	196.15	47-19	8-04
N2902	E-2902-09221	211-27	12/7/77	195.08	47-19	6-37

Tab. 4: Zusammenstellung der untersuchten Landsat-Bilder, für die geogr. Lage (Frame) s. Fig. 12

Das vorrangig zu lösende Problem für eine multitemporale Auswertung von Satellitendaten ist die genaue Orientierung auf den Bildern und eine präzise Überlagerung derselben. Drei Methoden sind hierzu getestet worden (LICHTENEGGER et al. 1978):

- Passpunktmethode: in den zu überlagernden Bildern werden Passpunkte festgelegt. Durch Vergleich der Koordinaten werden die Verschiebungsbeträge bestimmt.
- Visuelle Differenzbildanalyse: Der Betrachter beurteilt die zu vergleichenden Bilder als Positiv- und Negativ-Transparent-Bild. Im Durchlicht verschwinden bei optimaler Überlagerung die Konturen und es entsteht ein uniformer Grautoneindruck.
- Korrelationsmethode: es wird die (zweidimensionale) Kreuzkorrelationsfunktion bezüglich eines entsprechend grossen Ausschnittes im Vergleichsbild berechnet. Aus der Position des Maximums der Funktion wird der Verschiebungsbetrag berechnet. Dieser wird global (ganze Bildausschnitt) und lokal (kleine Subbilder) bestimmt.

1. DIE PASSPUNKTMETHODE

Die meisten Verfahren zur Ermittlung der Bildgeometrie eines Luft- oder Satellitenbildes basieren auf Passpunkten, die sowohl auf dem Bild als auch auf der Karte identifiziert werden können (KOELBL 1973, KIRBY 1975, HABERAECKER 1978). Wichtigste Anforderung an solche Passpunkte ist, dass sie unabhängig von der Jahreszeit im Bild deutlich erkennbar sind. Es kommen dafür einzelne Bildpunkte, wohldefinierte Flächen oder kurze, lineare Elemente (z.B. Flusskrümmungen) in Frage. Solche hellen, diffusen Strahler sind im Untersuchungsgebiet "Grossen Moos" z.B. die Gebäude und der Vorplatz beim Bahnhof Ins oder das grosse Dach der Reithalle bei Muntelier (Fig. 10 und 17).

Im stark vergrösserten Satellitenbild hebt sich der "Bahnhof Ins" in jeder der bearbeiteten Aufnahmen in den Spektralkanälen 4 und 5 gut ab; diese Videowerte sind, wie die Datenmatrix zeigt, 20- bis 40% höher als die Umgebung. Aus der Datenmatrix ersieht man aber auch, dass nur in der Mai- und Juni-Aufnahme eine eindeutige Zuordnung möglich ist: der "Bahnhof Ins" überblendet 3 Pixel von denen das mittlere als hellstes erscheint. In den anderen Bildern findet man an dieser Stelle entweder im Kanal 4 oder 5 zwei gleich hohe Werte. Der Passpunkt ist also nicht pixelgenau von einem Bild auf das andere zu übertragen.

Besser aufzufinden sind grössere Objekte wie die "Reithalle Muntelier". In den Kanälen 4 und 5 ist sie auf allen Bildern deutlich sichtbar. In der Datenmatrix erkennt man aber, dass die Halle je nach Überflug in 2 bis 4 Abtastzeilen aufgeteilt wird. Die Anzahl der Pixel mit deutlich höherem Videowert als die Umgebung schwankt zwischen 4 und 11. Das hellste Bildelement streut innerhalb der herausgehobenen Pixelgruppe.

Grössere Konturen oder Linien (wie Seeränder oder Flüsse) eignen sich ebenfalls als Orientierungspunkte. Seeufer sind im

Untersuchungsgebiet wegen des Schilfgürtels grossen jahreszeitlichen Veränderungen unterworfen. Bei starker Vergrösserung erscheinen Ränder und lineare Elemente als Pixeltreppen. Sie sind nur mit einer Sicherheit von plus/minus 2 Pixel von einem Bild auf ein anderes übertragbar.

Mit einem Experiment, künstliche Passpunkte auszulegen, wurde versucht, präzisere Orientierungshilfen zu schaffen.

1.1. Ein Spiegelexperiment

Die Kenntnis eines erfolgreichen Versuches (EVANS 1974), mit kleinen Spiegeln das Sonnenlicht in den Sensor des Satelliten zu reflektieren, hat uns bewogen, ein solches Experiment zu wiederholen. Zwei Fragen hofften wir damit beantworten zu können:

- sind künstliche Passpunkte vom Aufwand her für eine Bildregistrierung geeignet und
- wie genau ist die von TELESPAZIO mit TIPS durchgeführte geometrische Korrektur!

1.2. Berechnung von Azimut und Elevation der Reflektorachse

Mit unserem Spiegelexperiment versuchten wir, die Sonnenstrahlen im Moment des Satellitenüberfluges in den Sensor des Aufnahmesystems zu reflektieren. Entscheidend ist dabei, dass die Reflektorachse genau die Winkelhalbierende zwischen der Richtung zum Satelliten und der Richtung zur Sonne bildet. Dieser Winkel ist durch das Azimut und die Elevation der Spiegelachse gegeben. Auf die Berechnung dieser Grössen wird in Anhang 1 eingegangen. Einige Bemerkungen bezüglich Nadir, Bildmittelpunkt und Kurs des Satelliten sind aber hier noch nötig.

Die Bestimmung des Azimuts und der Elevation (Fig. 13) für die Spiegelpositionierung bietet keine nennenswerten Schwierigkeiten. Ausgehend von einem bekannten Subsatellitenpunkt (Bahnpunkt senkrecht auf die Erde projiziert), muss zuerst der Subsatellitenpunkt im Moment des Überflugs über den Spiegel berechnet werden. Man trifft dabei die Annahme, dass Nadirpunkt und Bildmittelpunkt identisch sind. Untersuchungen an 25 Landsat-Bildern (vorverarbeitet von NASA) zeigten eine mittlere Abweichung von 6.2 km oder 0.38 Grad (maximal 15km oder 0.93 Grad und minimal 1.5 km oder 0.09 Grad). Bei 60% der Bilder liegen die Abweichungen über dem vom Bordsystem für die Lagestabilisierung bekannten Toleranzwert von 0.43 Grad oder 6.8 km auf dem Erdboden (NASA 1972).

Die Diskrepanz zwischen Nadir- und Bildmittelpunkt wird durch Nicken, Rollen und Gieren des Satelliten verursacht. Der daraus resultierende Winkel zur Senkrechten wird nur im Bildmittelpunkt bestimmt. Berücksichtigt man die Divergenz der Sonnenstrahlen von 0.5 Grad (scheinbarer Sonnendurchmesser), so hätten sich von den oben untersuchten Bildern 24% für ein Experiment mit einem Planspiegel nicht geeignet.

Der nominale Kurs während einer Bildaufnahme ist aus den jeweiligen Bilddaten ersichtlich. Für 47.2 Grad Nord beträgt er 193.45 Grad. Nach den Angaben von TELESPIAZIO schwankte er 1976 zwischen 194.9 und 196.3 Grad (Tab. 4). Bei einer Kursabweichung von 3 Grad im Bildmittelpunkt verschiebt sich die Subsatellitenbahn bis zum Bildende um 4.9 km. Der Betrag liegt aber bereits ausserhalb der Toleranz von plus/minus 3.4 km. Kursabweichungen sind u.a. auf die veränderte Inklination, die Schiefe der Satellitenbahn zur Erdachse, zurückzuführen.

1.3. Zur praktischen Durchführung eines Spiegelexperimentes

Für die Berechnung der Spiegeljustierung sei auf Anhang 1 verwiesen. Neben den Bahnparametern, die teilweise aus dem "Landsat Data Users Handbook" (NASA 1972) ersichtlich sind, müssen folgende Grössen noch bekannt sein:

- Deklination der Sonne
- Zeitgleichung
- Position des Reflektors
- Position des Bildmittelpunktes
- Überflugszeit für den Bildmittelpunkt.

Die Deklination der Sonne und die Zeitgleichung sind in den astronomischen Jahrbüchern aufgelistet. Die Überflugszeit hat in der Berechnung eine relativ grosse Toleranz und kann aus den vorangegangenen Satelliten-Passagen extrapoliert werden. Der Satellit verfrüht sich jeweils in 18 Tagen um eine Minute. In der ersten Operationsphase der Satelliten war die Geschwindigkeitszunahme allerdings kleiner. Das Bildzentrum lässt sich nicht aus früheren Überflügen extrapolieren. Dieser Punkt schwankt maximal um 30km (55 Bilder). Offenbar wegen einer Bahnkorrektur beobachteten wir Mitte 1976 eine Versetzung der Bahn in östliche Richtung um rund 20km.

Für einen vollen Erfolg eines Spiegelexperimentes ist deshalb die rasche Verbindung zu einer Satellitenempfangsstation zur Übermittlung der obigen Grössen nötig. Unser Experiment zeigte dies deutlich. Die Verbindung zur NASA lief anfangs schlecht. Die Überflugszeit musste zuerst für Landsat-1 über drei Jahre und für Landsat-2 über 6 Monate extrapoliert werden. So erwarteten wir den Überflug im Mai 1976 vier Minuten zu früh. Die Passage im Juni erfolgte 40 km neben der von uns angenommenen Flugbahn. Im Juli und August 1976 war dann der Erfolg 75%, die Extrapolation erfolgte über kürzere Zeitabstände. Im September 1976 erhielten wir die Bahndaten per Telex 48 Stunden im voraus. Der Erfolg war 100%: alle vier Spiegelreflektoren sind auf dem Satellitenbild deutlich

auszumachen. Die Kenntnis der vorangegangenen oder vorausgerechneten Bahnparametern ist wichtig. Heute können in Fucino (Satellitenempfangsstation) die gewünschten Angaben 12 Stunden vor dem Überflug erfragt werden.

Um die Trefferwahrscheinlichkeit zu erhöhen, wurde ein Mosaik von mehreren 15x15cm-Planspiegeln gegeneinander leicht verkantet auf eine Holzplatte montiert. Damit betrug die Strahlbreite auf Satellitenhöhe rund 20km (statt 8km).

Die Spiegelposition wurde aus der Karte entnommen. Es ist keine grosse Genauigkeit erforderlich. Falls keine Karte zur Hand ist, genügt eine astronomische Positionsbestimmung, deren Genauigkeit nur im Kilometerbereich liegen muss.

Für die Azimuteinstellung hat EVANS (1974) die genaue Zeit und die Sonne benutzt, was offenbar zu häufigen Fehleinstellungen führte. Wir benutzten eine Kippregel und einen Minuten-Theodoliten und visierten damit einen vorher eingemessenen Punkt an. Vermutlich genügt für die Azimut-Einstellung schon ein präziser, gut gedämpfter Kompass (mit Kenntnis der Deklination und der lokalen Deviation). Die Toleranz liegt bei plus/minus 3 Grad.

Die Elevation muss auf ca. 20 Bogenminuten genau eingestellt werden. Diese Justierung muss mit entsprechender Sorgfalt gemacht werden.

Im Anhang 2 wird der Strahlungszuschlag diskutiert, der von einer spiegelnden Fläche zu erwarten ist.

Für unsere Spiegelanordnung beträgt der Zuschlag nach der Formel von EVANS (1976) in einem 8-bit-Messwert 11 Zählseinheiten. Das Experiment zeigt in der Datenmatrix vom Spiegel "Mole Neuenburgersee" (Fig. 15) eine Erhöhung von 20 Einheiten gegenüber der Umgebung. Neben den meteorologisch inhomogenen Verhältnissen (auflösender Nebel mit 2 km Horizontalsicht), geht als weiterer unsicherer Parameter die Spiegelfläche AM ein. Bei der eher ungenauen Konstruktion ist



Fig. 12: Die Landsat-Bahnen über die Schweiz mit der Bezeichnung der Szenen (Frames). In der Untersuchung wurden die Frames 210-027 und 211-027 verwendet

es sehr wahrscheinlich, dass der Sensor von 2 oder maximal 3 15x15cm Spiegeln getroffen wurde.

Unsere Reflektorkonstruktion war einfach und billig. Sie bestand aus drei schmalen Pressspanplatten, die zu einem U zusammengeschrubt, die Plattform mit dem Mosaik von Planspiegeln trug (Fig. 14). Diese Konstruktion wurde auf einem Stativ drehbar befestigt. Für die Justierung benützten wir, wie bereits erwähnt, eine Kippregel, die horizontal auf die Plattform und genau parallel zu einer Kante gelegt wurde. Der Referenzpunkt (z.B. ein Kirchturm) wurde durch Drehen der Spiegelkonstruktion um die Vertikale angepeilt. Mit einem Minuten-Theodolit, der im Drehpunkt der Spiegelplatte vorübergehend festgemacht wurde, stellten wir, wieder die Platte drehend, das Azimut relativ zum Referenzpunkt ein. Mittels einer Wasserwaage und des Theodoliten konnte man die Elevation durch Kippen der Platte minutengenau regulieren.

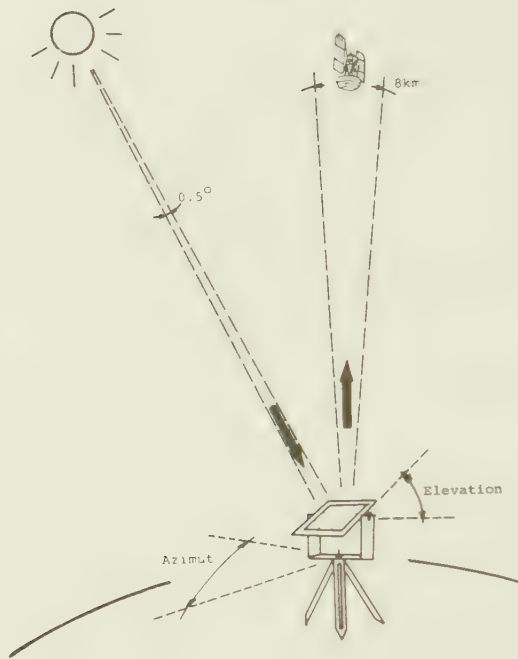


Fig. 13: Spiegelreflektor als Markierungspunkt in Satellitenbilder



Fig. 14: Spiegelreflektor "C" auf der südlichen Mole des Broyekansals im Neuenburgersee

1.4. Auswertung des Spiegelexperimentes

Die Spiegeljustierung ist nicht problemlos. Besonders die Elevation muss sorgfältig eingestellt werden. Erfolg und Misserfolg hängen aber nicht allein von der genauen Reflektoraufstellung ab, sondern auch von der Präzision mit der die Bahnparameter des Satelliten bekannt sind (Kap. C.1.3.).

Die vom spiegelreflektierten Sonnenlicht getroffenen Bildelemente, nachfolgend auch als Spiegelpixel bezeichnet, sind in Kanal 4 und 5 auf dem Filmprodukt (Massstab 1:3 Mio) mit der Lupe auszumachen. Belichtet man mit PHOTOMATION entsprechende Ausschnitte in grossem Massstab auf, kann man die Spiegelpixel gut lokalisieren (Fig. 17). Für eine genaue Orientierung, insbesondere zum Festlegen der Bildkoordinaten, ist es besser, sich die Datenmatrix der unmittelbaren Umgebung ausdrucken zu lassen (Fig. 15 und 16). Diese Bildkoordinaten verlaufen in der Flugrichtung (x-Richtung), ungefähr von Norden nach Süden, von Zeile 1 bis 2286 und in der Abtastrichtung (y-Richtung), im rechten Winkel dazu von Westen nach Osten von Kolonne 1 bis 3600.

Zur Genauigkeit der Pixelregistrierung:

Eine Durchsicht aller Spiegelpixel ergibt, dass meistens 2, in wenigen Fällen 3 Pixel in Abtastrichtung heller erscheinen. In der Flugrichtung konnte in den Nachbarzeilen kein eindeutiger Einfluss eines Spiegels festgestellt werden, obwohl das hellste Pixel meistens innerhalb die 6 gleichzeitig erfassten Abtastzeilen fiel. Dieser Befund spricht für die Genauigkeit des MSS von Landsat.

In Scanrichtung besteht durchschnittlich eine Überlappung von 23 Meter am Boden. Da das Messfeld am Boden für jeden Kanal das gleiche ist, sollte die reflektierte Strahlung eines Spiegelreflektors in allen Kanälen immer gleich zwischen

Spiegelpixel und Pixelnachbarn aufgeteilt werden. Diese Tatsache erlaubt allfällige Abtastdifferenzen zwischen den Spektralkanälen zu überprüfen. Bevor wir darauf eingehen, wollen wir noch die Spiegelpositionen betrachten. Zwei Reflektoren wurden in landwirtschaftlich genutztem Gebiet mit relativ hohen IR-Werten plaziert. Diese zwei Spiegel sind deshalb auch nur in den Kanälen 4 und 5 eindeutig auszumachen. In den IR-Kanälen 6 und 7 werden sie teilweise von der Umgebung überstrahlt. Zwei weitere Reflektoren stellten wir auf verschiedenen Molen, die über 200m weit in den See hinausragen, auf. Der recht homogene Bildhintergrund des Wassers erlaubt die Beziehung der Nachbarpixel zu den Spiegelpixel in allen Kanälen zu untersuchen. Die 5 untersuchten Fälle zeigten Folgendes:

- die Bildkoordinaten mit dem höchsten Videowert sind in allen 4 Kanälen dieselben
- die Verhältnisse der benachbarten Pixel sind in den einzelnen Kanälen verschieden. Sie verhalten sich auf allen untersuchten Bildern unsystematisch.

Besonders deutlich lässt sich das an den beiden Bildern M2559 (E-2559-09305) und N2902 (E-2902-09221) demonstrieren (Tab. 5). Nicht ganz auszuschliessen sind im Vergleich von M2559 mit N2902 die meteorologischen Einflüsse. Bei Überflug M2559 betrug die horizontale Sicht 20 km, bei N2902 nur rund 7 km. Über die Turbidität des Seewassers kann auch nichts ausgesagt werden, allerdings wurden beide Bilddaten bei Windstille und im Sommer (August 76, resp. Juli 77) gewonnen. Der Broye-Kanal entwässert den Murtensee, folglich ist die Broye von der Sedimentführung her ohne Einfluss. Allein aus den beiden Spiegelpixel "C" (Fig. 15) auf der Mole im Neuenburgersee lässt sich schliessen, dass zuerst Kanal 4, dann 5, 6 und zuletzt 7 abgefragt worden ist. Dies kann aber auch auf das kanalverschiedene Verhalten der Reflexion der Mole zurückzuführen sein; sie verläuft fast parallel zur Abtastrichtung.

PIXEL:	2769	2771	2773	2775	2777	2779	2781	2783	2785				
1462	4	8	8	8	4	8	12	30	48	24	8	12	12
1463	4	4	8	8	12	8	8	8	8	8	8	8	12
1464	6	6	6	6	6	6	6	6	8	10	6	14	10
1465	7	3	11	14	14	14	14	12	11	18	30	34	50
1466	5	8	11	15	18	15	18	18	18	18	22	25	29
1467	9	5	5	9	9	9	9	9	9	9	9	23	45
1468	8	8	8	4	4	8	8	8	8	8	12	12	12
1469	8	8	4	8	8	4	8	12	8	8	8	12	20

a)

PIXEL:	2769	2771	2773	2775	2777	2779	2781	2783	2785								
1462	7	7	11	7	7	7	15	30	18	7	11	11	18				
1463	8	8	8	4	8	8	8	8	11	11	8	11	11	15	39		
1464	9	9	9	9	9	9	9	9	9	5	5	9	23	48	62		
1465	8	8	12	12	8	8	8	12	8	12	20	24	48	60	52		
1466	8	-16-	32	12	12	12	12	16	12	12	20	32	32	32	36		
1467	7	10	14	10	10	14	14	10	14	10	10	14	18	22	41	52	48
1468	11	11	11	11	7	11	7	7	7	11	7	7	11	11	18	34	57
1469	8	8	8	8	8	8	8	8	8	11	8	11	11	11	18	42	52

b)

PIXEL:	2560	2562	2564	2566	2568	2570	2572	2574	2576					
1545	8	8	8	12	8	12	20	36	12	12	12	32		
1546	8	8	12	8	8	12	12	12	12	20	40	96		
1547	8	4	8	8	8	4	8	8	12	16	64	116		
1548	8	8	12	12	12	12	20	20	44	76	104	100	80	
1549	8	-44-	88	16	20	16	20	20	20	24	36	44	32	
1550	4	12	12	4	12	12	12	12	12	12	20	48	80	
1551	8	8	8	8	8	8	8	12	8	8	12	20	64	
1552	8	8	8	12	8	12	12	8	12	8	12	16	52	96

c)

Fig. 15: Spiegelpixel "C" auf der Broye-Mole im Neuenburger-see. In der Datenmatrix ist die Mole als Doppelzeile mit leicht erhöhten Videowerten gut vom Wasser unterscheidbar.

- a) Bild M1429, Kanal 7, ohne vom Spiegelreflektor geblendetes Pixel
- b) Bild N1518, Kanal 7, mit Spiegelpixel am Molenende
- c) Bild N2902, Kanal 7, der Reflektor hat 2 Pixel getroffen

PIXEL:	2898	2900	2902	2904
1479	30	30	30	30
1480	27	27	30	32
1481	28	28	36	30
1482	26	29	29	26
1483	29	29	29	26
1484	26	28	28	25
1485	27	27	27	25

a)

PIXEL:	2898	2900	2902	2904
1479	27	29	29	27
1480	25	27	27	30
1481	26	26	26	34
1482	26	24	26	29
1483	26	26	26	28
1484	24	24	26	26
1485	25	25	25	27

e)

PIXEL:	2898	2900	2902	2904
1479	23	28	26	26
1480	19	19	26	26
1481	18	18	25	20
1482	20	20	16	16
1483	16	18	18	15
1484	17	19	19	15
1485	19	19	17	15

b)

PIXEL:	2898	2900	2902	2904
1479	22	22	22	22
1480	21	21	24	26
1481	19	22	24	31
1482	19	21	19	21
1483	21	19	21	21
1484	19	19	19	21
1485	20	18	20	20

f)

PIXEL:	2898	2900	2902	2904
1479	22	69	35	38
1480	17	15	24	40
1481	15	17	26	22
1482	13	16	14	13
1483	18	20	18	18
1484	18	19	18	14
1485	12	12	11	15

c)

PIXEL:	2898	2900	2902	2904
1479	38	41	33	41
1480	21	21	23	30
1481	23	19	21	30
1482	21	19	19	21
1483	21	21	19	22
1484	18	20	20	24
1485	21	19	19	19

g)

PIXEL:	2898	2900	2902	2904
1479	16	79	25	23
1480	4	8	16	20
1481	4	4	16	8
1482	4	4	4	6
1483	6	6	6	1
1484	5	5	5	4
1485	4	4	4	4

d)

PIXEL:	2898	2900	2902	2904
1479	33	33	22	18
1480	11	15	11	18
1481	11	11	11	22
1482	9	12	12	12
1483	8	8	12	12
1484	12	8	8	16
1485	7	10	7	10

h)

Fig. 16: Spiegelpixel "D" auf der Broye-Mole bei Sugiez im Murtensee

- a) bis d) Ausschnitte aus der Datenmatrix von Bild N1518 in Kanal 4 bis 7
e) bis h) Ausschnitte aus der Datenmatrix von Bild M2559 in Kanal 4 bis 7

Kanäle	Verhältnis der Pixel: $k+1/k-1$	
	M2559	N2902
4	1	1
5	0.78	1
6	0.85	1.47
7	0.5	1.28

Tab. 5: Nachbarbeziehung der vom Spiegel "D" getroffenen Pixel in Abtastrichtung des Scanners, k = y-Koordinate des Spiegelpixels

Unklar bleibt auch, inwiefern die Daten in der Vorverarbeitung (Empfangstation Fucino) verändert worden sind. Bei der radiometrischen Kalibrierung werden die Videowerte verändert, und bei der geometrischen Korrektur werden unter Umständen Pixel verdoppelt oder ausgelassen (Kap. A.4.2.).

Schlussfolgerung: Die Registriergenauigkeit zwischen den Kanälen desselben Bildes ist optimal. Die Ansprechcharakteristik ist für alle Kanäle gleich und, wie die Abklingzeit, offensichtlich genügend kurz.

Zur gegenseitigen Distanz der Spiegelpixel:

An den folgenden 5 Punkten wurde je 1 Spiegel aufgestellt (in Kilometer-Koordinaten der Schweizerischen Landeskarte); man vergleiche dazu auch Fig. 10:

Punkt A:	Nusshof	571.436 / 205.905
Punkt B:	Schuelmoos	573.432 / 205.607
Punkt C:	Mole Neuenburgersee	568.813 / 203.456
Punkt D:	Mole Murtensee	575.598 / 200.518
Punkt E:	Geogr. Institut, Zürich	683.746 / 249.087

Punkt D ist ein Vermessungspunkt der Landestopographie, Punkt

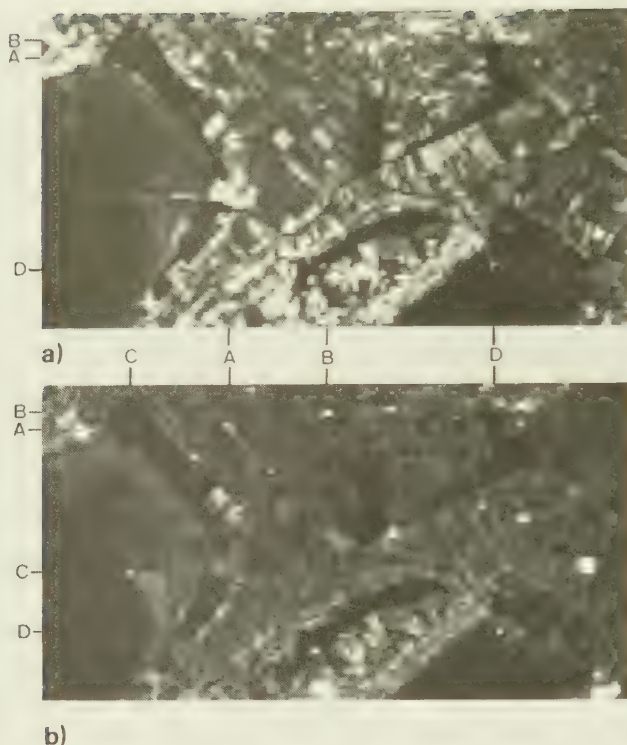


Fig. 17: Kanal 5 der Bildausschnitte a) M2559 und b) N1518 des Untersuchungsgebietes "Grosses Moos" mit den Spiegelpixel A, B, C und D

C ist ein kantonaler Vermessungspunkt. Die Orte A, B und E sind mittels bekannter Punkte aus der Umgebung eingemessen worden. Eine Nachprüfung auf der Karte 1:25'000 ergab, dass alle Punkte innerhalb einer absoluten Messgenauigkeit von 7.5m bestimmt werden konnten.

Die Bildkoordinaten der Spiegelpixel wurden aus der Datenmatrix entnommen und die Distanzen in Pixeleinheiten

Strecke	Anzahl Fälle	Mittlere Distanz (Pixel-Einheiten)	Standard-abw.	Pixel-distanz	Karten-distanz
AB	3	35.77	1.15	2008 m	2018 m
AC	3	50.23	0.65	3585 m	3589 m
AD	2	108.80	0.57	6770 m	6807 m
BC	4	80.28	0.94	5004 m	5095 m
BC	3	80.40	1.51	5447 m	5531 m
CD	3	129.93	1.71	7325 m	7394 m
AE	1	1945.32	-	118458 m	120324 m

Tab. 6: Abstände der Spiegelpixel und Vergleich mit der Karte

bestimmt. Die Anteile der mitgetroffenen Nachbarpixel sind aus den oben erwähnten Gründen nicht mitberücksichtigt worden. Tab. 6 zeigt die Mittelwerte dieser Abstände und die Standardabweichung. Die mit der Karte verglichenen Pixel-Distanzen gewinnt man aus den mittleren Koordinatendifferenzen. Die x-Koordinatendifferenz wird dabei mit 79 Meter, die y-Differenz mit 56 Meter multipliziert. Nach NASA (1972) beträgt die Überlappung zwischen zwei Pixel in Abtast-Richtung im Mittel 23 Meter.

Eine Nachprüfung der Pixelgrösse durch SLATER (1979) ergab für die Normhöhe von 918.6km leicht verschiedene Resultate. Nach dieser Untersuchung beträgt das "in track sampling intervall" 81.6m +/-0.5m, die Länge der Messfläche (IFOV) 76.2m +/-0.5 m, statt 79m. Die "sampling rate", also die Pixelbreite ist für Landsat-1 zu 57.9m, für Landsat-2 zu 57.4m und für Landsat-3 zu 58.3m berechnet worden. Diese Angaben schwanken je nach Satellitenhöhe zwischen +1.8m (940km Satellitenhöhe) und -3.2m (bei 880km Höhe).

Ein direkter Vergleich zwischen Karte und Satellitenbild ist deshalb möglich, weil es sich in beiden Fällen in kleinen Bereichen um rechtwinklige Koordinatensysteme handelt. Der

"image-skew" ist, wie in Kap. A.4. erwähnt, in der Vorverarbeitung korrigiert worden. Die Koordinatensysteme sind jedoch um den Bahnwinkel des Satelliten gegenüber der geographisch Nordrichtung und der Meridiankonvergenz der Karte gegeneinander verdreht.

Tab. 6 zeigt in der Kolonne der Standardabweichung wie präzise entsprechende Pixeldistanzen in den verglichenen Bildern dargestellt werden. Unsere genau ausgelegten, künstlichen Passpunkte werden im Landsat-Bild nicht mit einer Zuverlässigkeit von 56m x 79m (1 Pixel) abgebildet, sondern aufgrund der ungenügend korrigierten Daten, wie weiter unten noch gezeigt wird, entschieden ungenauer.

Betrachten wir noch die letzte Kolonne von Tab. 7. Die durchwegs negativen Abweichungen von der Karte weisen darauf hin, dass für eine Distanzmessung auf dem Satellitenbild ein grösseres Seitenverhältnis der Pixel als 56/79 anzunehmen ist. Mit 23m Pixel-Überlappung in y-Richtung, stimmen zwei von sechs gemittelten Strecken schlechter als auf ein Pixel genau mit der Karte überein.

Vergleich "Landsat-Bild" mit "Karte" über eine grosse Strecke:

Gesondert untersuchen wollen wir die Strecke AE. Ihre Bildkoordinaten sind die folgenden:

Punkt A x = 2053 y = 731

Punkt E x = 1218 y = 2488

Die Passpunkte stammen von zwei Spiegelreflektoren, die am 11. Juli 1977 in einem Abstand von 120km im "Grossen Moos" und auf dem Dach des Geographischen Instituts der Universität Zürich aufgestellt wurden. Wie die Koordinaten und Fig. 18 zeigen, läuft die Strecke quer durch das Bild und erlaubt somit die Verhältnisse des Massstabes praktisch über ein ganzes Bild hinweg zu überprüfen. Mit einer Pixelgrösse von 56m x 79m



Fig. 18: Landsat-Bild E-2901-09163 (M2901), Kanal 7, mit der Messstrecke AE zwischen zwei 120 km entfernten Spiegelreflektoren

beträgt der Fehler gegenüber der Karte minus 1866 $\pm$ 79m (Tab. 6). Dieser Fehler reduziert sich praktisch auf Null, wenn man die Pixelgrösse von 57.27m x 79.0m (Überlappung 22.73m) einsetzt. Unser Bild M2901 wird also mit einem Seitenverhältnis der Pixel:

$$57.27 \text{ m} : 79.0 \text{ m} = 0.725$$

scheinbar optimal der Karte angepasst. Dieses Verhältnis gilt aber nur global. Setzt man es nämlich für die kleinen Distanzen im "Grossen Moos" ein, steigt die Variationsbreite (Maximum minus Minimum) in Tab. 7 auf über 100 m an. Berücksichtigen wir die Nachprüfung von SLATER (1979), ergibt sich bei der Satellitenhöhe von 923.8km (nach TELESPAIO-Header) eine Distanz von 122.4 $\pm$ 1km.

Die von TIPS errechnete geometrische Korrektur bezieht sich auf die UTM-Projektion (Universal Transverse Mercator),

während die Distanzmessung auf der Schweizerischen Landeskarte (schiefachsige Zylinderprojektion) vorgenommen wurde. Der Unterschied zwischen beiden Kartenprojektionen beträgt für unsere Distanz weniger als 40m (mitgeteilt von Herrn Oetli, Landestopographie Bern).

Aus dieser Gegenüberstellung folgern wir, dass die Landsat-Bilder in der Vorverarbeitung global ungenügend korrigiert werden. Aber auch für den lokalen Bereich zeigt

Strecke	M2559	N1518	N2542	N2902	Mittel
AB	-60	-44	-44	-	-10
AC	-100	-70	-38	-	-4
AD	-31	-41	-	-	-37
BC	-65	-60	-146	-60	-91
BD	-76	-4	-	-169	-84
CD	-102	+37	-	-141	-69
AE	-	-	-	-	-1866
Max.-Min.	71	107	108	109	-

Tab. 7: Registrierungs-differenzen einzelner Landsat-Bilder im Vergleich mit der Karte. Pixeldistanz minus Kartendistanz. Mittel nach Tab. 6 (in Meter)

Tab. 7, dass unter der Annahme von 23m Pixelüberlappung 5 von 18 Streckenmessungen, oder 28% ausserhalb der Pixel-Genauigkeit liegen. Die Strecke CD mit kleinstem x/y-Bildkoordinaten-Verhältnis (0.12) kann nur mit einer Sicherheit von 2 Pixeln angegeben werden. Variiert man die Pixelbreite, geht zwar der Mittelwert der Registrier-differenzen innerhalb eines Bildes gegen Null, jedoch steigt die Variationsbreite an (Kap C. 4.4.2.).

Mit Fehlern von 2 Pixeln muss offensichtlich bei Bildregistrierungen mit der Passpunkt-Methode gerechnet werden.

Zur Kartenanpassung:

Um unsere geometrisch korrigierten Landsat-Bilder der Karte anzugleichen, muss das Bildkoordinatensystem nach Norden ausgerichtet werden. Der Drehwinkel kann angegeben werden als:

$$v = \tan \frac{\text{x-Kartenkoord.diff.}}{\text{y-Kartenkoord.diff.}} - \tan \frac{\text{y-Bildkoord.diff.}}{\text{x-Bildkoord.diff.}}$$

x-Bildkoordinaten = Flugrichtung

y-Bildkoordinaten = Abtastrichtung MSS

Der Winkel zwischen den beiden Koordinatensystemen kann über identische Strecken in beiden Systemen bestimmt werden. Wir benutzten dazu die Distanzen zwischen den Spiegelreflektoren. Für jedes Bild erhielten wir auf diese Weise eine mittlere Winkeldifferenz zwischen den Kartenkoordinaten (was der Nordrichtung entspricht) und den Bildkoordinaten des Satellitenbildes. Der ermittelte Winkel entspricht jedoch recht ungenau der Satellitenbahn gegenüber der Nordrichtung. Die Meridionalkonvergenz ist im Verhältnis viel geringer als alle anderen Fehler. Zum Vergleichen nehmen wir den Kurs des Satelliten, wie er in der Header-Information von der Datenempfangsstation mitgeliefert wird.

	M2559	N1518	N2542	N2902
wahrer Winkel zu Nord (a)	16.288	14.992	15.254	16.157
Winkel n. Strecken (b)	13.411	14.449	14.157	14.258
Standardabweichung	1.230	0.856	1.584	0.371
Variationsbreite	3.092	2.266	3.017	0.740

Tab. 8: Drehwinkel zwischen Karte und Landsat-Bilder:
Vergleich zwischen Header-Information (a) und gemitteltem Winkel aus Streckenmessungen (b)

Es war zu erwarten, dass, wie Tab. 8 zeigt, die Bahnwinkel gegenüber Nord sehr unsicher bestimmt werden können. Wie genau der von der Bodenstation angegebene Wert ist, lässt sich auf diese Weise nicht überprüfen.

1.5. Vor- und Nachteile der Passpunktmethode

Die Methode ist billig und mit relativ einfachen Mitteln anwendbar. Sie ist geeignet, pixelgenau und gut erkennbare Passpunkte zu liefern.

Für unser Experiment mussten die Spiegel für jeden Überflug transportiert, montiert und justiert werden. Es liessen sich aber Standorte finden, wo festinstallierte, mosaikartig konstruierte Planspiegel oder gekrümmte Spiegel für längere Zeit praktisch wartungsfrei aufgestellt werden könnten. Der Winkelbereich, der die Landsat-Bahnen einer ganzen Vegetationsperiode für unser Testgebiet abdeckt, liegt bei 25 Grad für das Azimut und bei 10 Grad für die Elevation. Mit einem Planspiegel erreicht man nur eine Streuung von 0.5 Grad. Günstiger sind leicht gekrümmte Spiegel, allerdings wird dabei die Rückstrahlung reduziert.

Die Methode ist besonders geeignet in texturschwachen oder texturarmen Landschaften. Nach EVANS (1976) kann sie auch in schneebedeckten Gegenden angewandt werden. Solche (festinstallierten) Passpunkte könnten für die trigonometrische Vermessung von kleinmassstäbigen Karten dienen, z.B. für Karten in Entwicklungsländern. Für eine interaktive Bildauswertung sind solche Passpunkte auf dem Bildschirm schnell auffindbar und eignen sich als Orientierungshilfen. Für eine Bildregistrierung könnten sie als erste Näherung dienen.

Grösster Nachteil ist die Ungenauigkeit mit der die Bildelemente innerhalb der Daten von Satellitenempfangsstation verschoben werden. Eine pixelgenaue Registrierung wird dadurch erschwert.

Zukünftig wird es aber möglich, bessere Korrekturprogramme anzuwenden. Neue MSS-Systeme werden frei von jeder Mechanik arbeiten (ESRO 1974). Solche rein optisch-elektronische Aufnahmesysteme werden geometrisch verlässlichere Daten liefern.

2. DIE VISUELLE DIFFERENZBILDANALYSE

Wie die Passpunktmethode gezeigt hat, werden einzelne Bildelemente nicht genau abgebildet. Eine weitere Möglichkeit der Bildregistrierung besteht darin, kleine Bildteile der zu überlagernden Bildern miteinander zu vergleichen. Dies haben wir mit Filmprodukten von Satellitenaufnahmen versucht.

Das eine Bild wird als Dia-Positiv verwendet. Vom zu vergleichenden Bild benutzt man ein gradationsgleiches Negativ. Die beiden Vorlagen werden aufeinandergelegt und im Durchlicht beurteilt. Durch gegenseitiges Verschieben wird die beste Korrelation gesucht. Sie ist dann erreicht, wenn möglichst alle Konturen verschwinden und ein einheitlicher Grautoneindruck vorliegt. Das in die beiden Vorlagen eingebrachte Gitter erlaubt die Verschiebungsbeträge und den Drehwinkel herauszulesen. Für die beiden Landsat-Ausschnitte E-2559-09305 vom 3.8.76 (M2559) und E-1518-09024 vom 18.9.76 (N1518) ergab sich

ein Verschiebung von $x = +328$ $(+/-2)$ Pixel
 $y = -2157$ $(+/-2)$ Pixel

und einen Drehwinkel von $v = 1.2$ $(+/-0.2)$ Grad.

Die Abbildung besteht aus einer reinen Translation zwischen den Bildkoordinaten beider Bilder in x , der Flugrichtung und in y , der Abtastrichtung des Satelliten.

Der Drehwinkel kann auch aus der Header-Information der Bilder interpretiert werden. Es ist die Differenz der Nominalkurse gegenüber der Nordrichtung. Nach Tab. 4 beträgt die Differenz der Satellitenbahn-Kurse 1.296 Grad. Die Kursdifferenz bezieht sich jeweils auf den Bildmittelpunkt und ist, da die Scanlinien auf die Erdoberfläche bezogen gekrümmt erscheinen (scan-skew), nur bei optimal geometrisch korrigierten Bildern auch an den Bildrändern gültig.

2.1. Vor- und Nachteile der visuellen Differenzbildanalyse

Wichtig für die Beurteilung der Differenzbilder ist eine gute Tonreproduktion der Bilder auf Film. Die Methode ist sonst aber einfach und billig und die Resultate bei kleinem zeitlichen Aufwand erstaunlich genau.

Es können jedoch nur Bilder oder Bildausschnitte mit viel Textur, vor allem mit kontrastreichen Rändern (Seeufer) nach dieser Methode bearbeitet werden. Bei der Beurteilung der Korrelation wirken sich jahreszeitlich schnell ändernde Objekte (z.B. landwirtschaftliche Felder) erschwerend aus. Günstiger sind in Kanal 4 und 5 die Wälder bei Sommerbildern und in Kanal 6 und 7 Seen und Flüsse. Für das Einpassen von kleinen Bildteilen (Subbilder), wie in Kap. C.3.1. besprochen, ist unser Auge aber bald überfordert.

3. DIE DIGITALE BILDKORRELATION

Wie aus dem vorangegangenen Kapiteln zu ersehen war, ist eine flächenhafte Bildanpassung zuverlässiger als eine punktweise. Die analoge Methode für eine flächenhafte Bildkorrelation scheitert aber bald an der Urteilskraft unserer Augen (bei kleinen Bildteilen). Wir haben deshalb diese Korrelation durch

den Computer ausführen lassen.

Es hat sich beim Vergleich von Nachrichtensignalen bewährt, den Korrelationsgrad als quantitatives Mass der Übereinstimmung von zwei Signalen zu verwenden. Der Korrelationskoeffizient ist definiert als:

$$k = \frac{\sum_{i,j=1}^n x_{ij} y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i,j=1}^n x_{ij}^2 \sum_{i,j=1}^n y_{ij}^2}}$$

k	Korrelationskoeffizient
x	Videowerte (Messwerte) des Originalbildes
y	entsprechende Videowerte im Vergleichsbild

Einem Vorschlag von LINFOOT (1964) folgend, lässt sich bei Bildern die Übereinstimmung entsprechend angeben. Anschaulich bedeutet dies: Mit einem "Fenster" wird auf dem Originalbild ein Ausschnitt festgelegt. Das Vergleichsbild wird nun unter diesem Fenster hin- und herbewegt und die Übereinstimmung zwischen dem stationären Ausschnitt des Originals und dem beweglichen des Vergleichsbildes ermittelt.

Mathematisch lässt sich dieses Vorgehen durch die Korrelationsfunktion erfassen. Sie ist definiert durch den Ausdruck

$$K_{g_1 g_2}(a) = \frac{\int_F g_1(x) g_2(x-a) dx}{\sqrt{\int_F g_1^2(x) dx \int_F g_2^2(x) dx}}$$

K	Korrelationsfunktion
F	Fenster
g_1	Originalbild
g_2	Vergleichsbild
a	Verschiebungsbetrag

Der Wertebereich dieser Funktion geht von -1 bis $+1$. Mit dem Auffinden des Maximums der Korrelationsfunktion, d. h. dem maximalen Korrelationskoeffizienten, hat man die gegenseitige Lage der Bilder gefunden, die der besten Übereinstimmung entspricht. Für $t=1$ spricht man von "Gleichheit", für $t=-1$ verhalten sich Original und Vergleichsbild wie ein fotografisches Positiv und Negativ (vom gleichen Objekt) zueinander. Für $t=0$ besteht keine Übereinstimmung der Informationsgehalte.

Die zu vergleichenden Bilder können nun neben der Parallelverschiebung und den leicht verschiedenen Texturen noch gegeneinander verdreht sein. Sie können aber auch einen unterschiedlichen Massstab oder Verzerrungen aufweisen. Mit solchen Abweichungen wird in jedem Fall das Korrelationsmaximum reduziert.

Die Korrelationsrechnung wertet quantitativ die Modulationsunterschiede beider Bilder aus, ähnlich wie es subjektiv bei der visuellen Differenzbildanalyse (Kap. C.2.) durch das menschliche Auge geschieht. Scharf umrissene, kontrastreiche Details, wie Felder, Flüsse und Seeränder, liefern dabei den wesentlichen Anteil.

Unsere Bilder liegen in digitaler Form vor. Die numerische Bestimmung der diskreten Form der Korrelationsfunktion (Korrelationsmatrix) erfolgte in der vorliegenden Arbeit mit Hilfe des Faltungstheorems über die Fouriertransformierte (COOLEY et al. 1967). Dabei wird der Bildinhalt ausserhalb der gewählten Ausschnitte periodisch fortgesetzt.

Das Rechnen der Kreuzkorrelationsfunktion ist aufwendig, deshalb beschränkten wir die Bild- resp. Fenstergrössen, die korreliert werden, auf 256×256 Bildelemente.

WONG et al. (1978) schlagen eine hierarchische Staffellung der Registrierung vor, indem zuerst die tiefen Raumfrequenzen von schlechtauflösenden Bildern benutzt werden. Praktisch

geschieht dies durch Zusammenfassen von Bildelementen. Auf diese Weise wird eine erste, noch ungenaue Überlagerung von zwei Bildern rasch, also in wenigen Korrelationsschritten, erreicht. Das Verfahren erlaubt somit praktisch ein automatisches Registrieren.

Der Idee von WONG folgend, ersetzen wir den ersten Korrelations-Schritt durch einen groben visuellen Vergleich der Bilder und bestimmten die Bildkoordinaten auf beiden Vorlagen, wo die Korrelationsrechnung beginnen sollte (Startpunkt). Die Erfahrung hat gezeigt, dass das Korrelationsmaximum auf diese Weise im allgemeinen nach einem einzigen Rechendurchgang gefunden wird.

3.1. Die praktische Anwendung der digitalen Bildkorrelation

Um die Bilder mit der Korrelationsmethode optimal zur Deckung zu bringen, sind wir in 3 Stufen vorgegangen:

1. Stufe:

Mit Hilfe der digitalen Korrelation wurden zuerst die Verschiebungsbeträge in Pixel-Einheiten (Bildkoordinaten) zwischen zwei grösseren Bildteilen gefunden (Fig. 21a und 21b). Die benutzte Fenstergrösse beträgt 256x256 Pixel. Der Startpunkt für diesen ersten Korrelation-Schritt muss auf eine halbe Fenstergrösse genau vorgegeben werden. Das entspricht auf einem Landsat-Bild mit einem Massstab von 1:3Mio. einer Ablesegenauigkeit der Bildkoordinaten von etwa 2.5 mm. Mit Bildern von unserem Texturreichtum ist eine solche Genauigkeit sehr leicht einzuhalten.

Die graphische Darstellung der globalen Kreuzkorrelation ergibt, wie in Fig. 19 dargestellt, einen eindeutigen "Peak". Die Korrelationsrechnung liefert dazu den Verschiebungsbetrag in Pixel-Einheiten. Für die beiden Bilder Fig. 21a und 21b



Fig. 19: Beispiel einer globalen Kreuzkorrelationsfunktion zwischen einem Landsat-Bildausschnitt (Fig. 20a) von M1392 und M2559, 256x256 Pixel, nach RUCHTI und KUEBLER (1977)

beträgt er:

$$\begin{aligned}x &= +328 \quad (+/- 0.5) \text{ Pixel} \\y &= -2157 \quad (+/- 0.5) \text{ Pixel}\end{aligned}$$

D.h. die Objekte beider Bilder haben dann gleiche Bildkoordinaten, wenn Bild M2559 um diese Anzahl Pixel verschoben wird. Die Translation erfolgt praktisch durch Neueintrag der Eckkoordinaten in den Bild-Header (ZDF-Format, SEIDEL 1975).

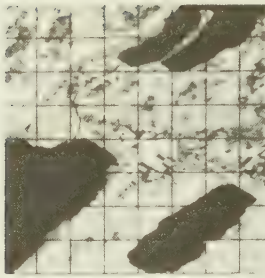
2.Stufe:

Visuell werden die überlagerten Bilder anhand eines digital entstandenen Differenzbildes beurteilt (Fig. 21c). Differenzbilder entstehen durch Subtrahieren entsprechender Videowerte beider Bilder. Wo die Differenz Null ergibt, erscheint uns das Differenzbild in mittlerem Grau (Seen). Flächen mit grossen Unterschieden zwischen den Bildern werden

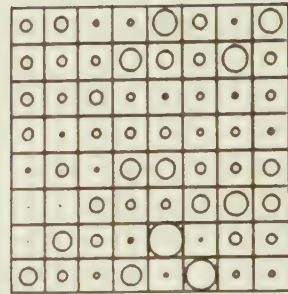
entweder hell oder dunkel abgebildet. Besonders anhand der Seeränder und Flüsse erkennt man, dass Bild M2559 und N1518 (Fig. 21c) schlecht zur Deckung gebracht wurden.

Mit kleinen Bildteilen, Subbildern von 32×32 Pixel, werden nun innerhalb unseres Landsat-Bildausschnittes die lokalen Translationen bestimmt. Für die Wahl solcher Subbilder ist es wichtig, Bildteile mit grosser Varianz, also hohem Kontrast auszusuchen. Fig. 20a zeigt das Untersuchungsgebiet mittels eines Gitters aufgeteilt in Subbilder von 32×32 Pixel. Von jedem dieser Subbilder ist die normalisierte Varianz gerechnet worden (RUCHTI und KUEBLER 1977). Sie ist als Kreis in den entsprechenden Subbildern in Fig. 20b eingetragen. Je grösser der Radius des Kreises, umso grösser ist auch die Varianz der Information in diesem Subbild. Der Vergleich von Fig. 20a und Fig. 20b sagt aus, dass sich die Subbilder, die Seeränder enthalten, durch besonders grosse Varianz auszeichnen. Auch eine Felder-Textur (z.B. etwas unterhalb der Bildmitte) liefert eine relativ gute Varianz. Subbilder, die genau in die Seen fallen, weisen demgegenüber keinen Kontrast auf: der Kreis reduziert sich zu einem Punkt (oberhalb der linken, unteren Ecke). Unsere Auswahl von Subbildern für eine bildgeometrische Analyse sind aus Fig. 23 ersichtlich. Die mittels Rechnung gefundenen lokalen Abweichungen zwischen Bild M2559 und N1518 sind dort und in Tab. 10 in Pixel-Einheiten eingetragen. Bezieht man sich auf den Subbild-Mittelpunkt, können wie bei der Passpunktmethode die Verschiebungsbeträge zwischen den zu überlagernden Bildern gefunden werden. Als entscheidende Vorteile gegenüber der Passpunktmethode sind folgende Argumente anzuführen:

- Kein mühsames Auswählen, Aufsuchen und Ausmessen von Passpunkten. Es sind nur kontrastreiche Bildteile zu eruieren.
- Keine Fehlregistrierung wegen einzelner ungenau zugewiesener Bildelemente in der Vorverarbeitung der Satellitenbilddaten.



a)



b)

Fig. 20: Texturgehalt des Bildausschnitts M1392.

a) Originalbild

b) 64 Quadrate, 32x32 Pixel, die Kreisdurchmesser entsprechen der normalisierten Varianz, nach RUCHTI und KUEBLER (1977)

Das Aufsuchen des Startpunktes für die Korrelation der Subbilder fällt weg, da unsere Bilder nach erfolgter Translation aus der "1. Stufe" (über den ganzen Bildausschnitt korreliert) hier im schlechtesten Fall, bereits auf 4 Pixel genau Übereinstimmen (Tab. 10, Kolonne 21c, Translation).

3. Stufe:

Aus hinreichend vielen Subbildern, deren Translationen bekannt sind (Fig. 23), können die Parameter für eine geometrische Transformation des ganzen Bildes berechnet werden (Kap. C.4.). In einem nächsten Schritt wird die Transformation durchgeführt. Dabei geht man in der üblichen Weise vor: vom neuen Koordinatensystem (i_n, j_n) ausgehend, wird das Koordinatenpaar des alten Systems (i_a, j_a) bestimmt, und der dortige Videowert in das neue Bildkoordinatensystem übernommen. Genauer: es wird durch Runden der nächstliegende Nachbar bestimmt. Das neue Vergleichsbild kann nun wieder mit dem Original digital korreliert und anhand des Differenzbildes

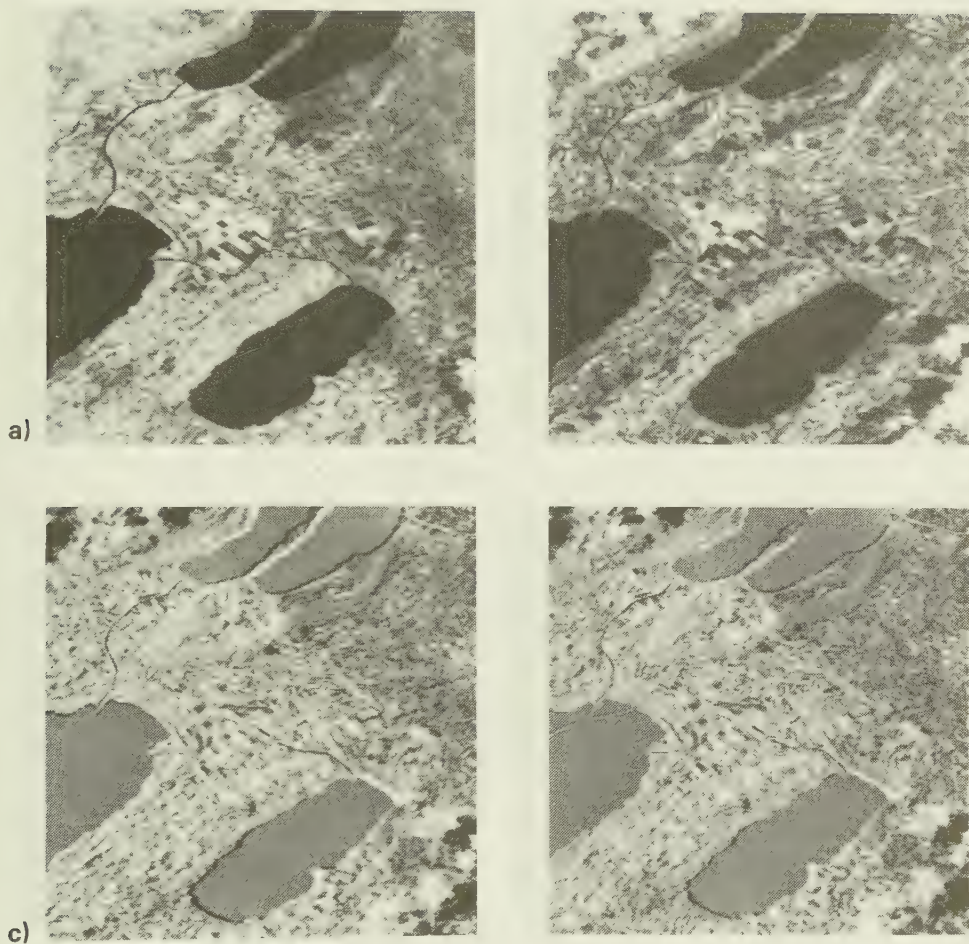


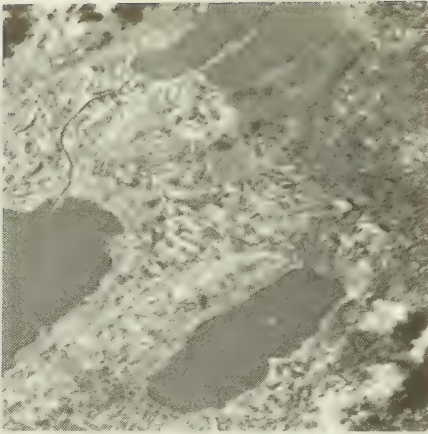
Fig. 21: Vergleich verschiedener geometrischen Transformationen

a) Original M2559, Kanal 7

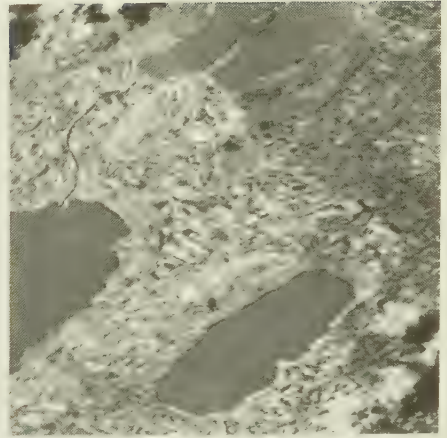
b) Original N1518, Kanal 7

c) Differenzbild: nur Translation von M2559

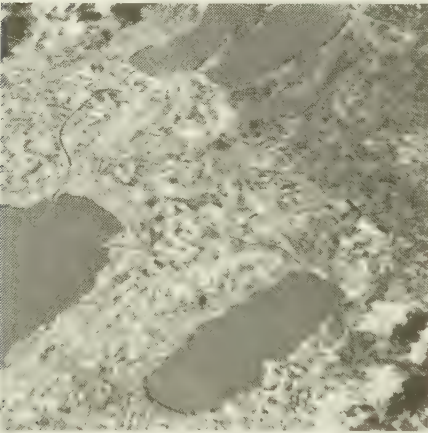
d) Differenzbild: Drehung von M2559 nach Spiegelpositionen



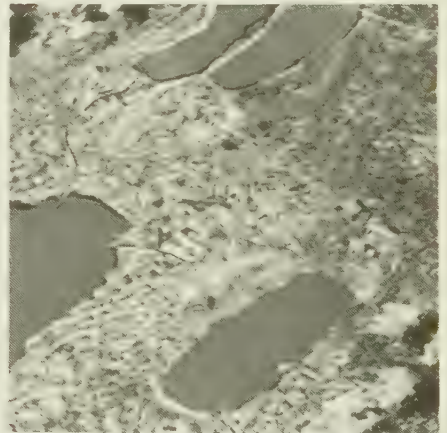
a)



b)



c)



d)

Fig. 22: Vergleich verschiedener geometrischen Transformationen

- a) Differenzbild M2559 minus N1518: Drehung von M2559 nach Bahnparameter-Angaben
- b) Differenzbild: Drehung nach Korrelationsmethode mit Subbildern 1 bis 9 (Fig. 23)
- c) Differenzbild: affine Transformation mit den Subbildern 2, 7, 8
- d) Differenzbild: Polynomtransformation 2. Grad aus den Subbildern 1, 2, 3, 4, 7, 8

beurteilt werden. Man vergleiche dazu die Versuche von verschiedenen geometrischen Transformationen mit ihren Differenzbildern in Fig. 21 und 22. Die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten sind in Tab. 9 zusammengefasst, die Residualwerte ersieht man aus Tab. 10. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt in den beiden nächsten Kapiteln.

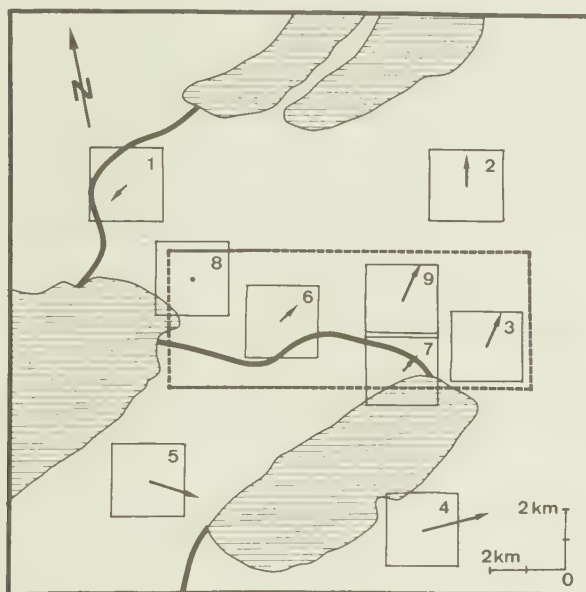


Fig. 23: Geographische Situation mit den Subbildern und ihren Abweichungen zwischen M2559 (nach erfolgter Translation) und N1518, in Pixel-Einheiten (für die Beträge der Vektoren s. Tab.10)

4. GEOMETRISCHE TRANSFORMATIONEN FÜR DIE BILDREGISTRIERUNG

In einer geometrischen Transformation wird die Lage jedes Bildelementes innerhalb der Bildkoordinaten neu bestimmt, d.h. jedem Bildelement wird ein neues Koordinatenpaar zugewiesen. Das neue Bild erscheint uns gegenüber dem alten mehr oder

weniger verzerrt. Ziel ist die geometrische Anpassung an ein Vergleichsbild.

Landsat-Bilder sind sog. nichtlineare, also nur analytisch zu beschreibende Abbildungen der Erdoberfläche (BAEHR et al. 1979, KONECNY 1976). Da die Bahnparameter und die Lage im Raum des Satelliten bei jedem Überflug verschieden sind, tritt auch zwischen den Bildern Nichtlinearität auf. Die Bildregistrierung und die Kartenanpassung kann aus rechentechnischen Gründen nur angenähert werden. Restfehler oder Residuen hält man je nach Fragestellung und Aufwand in Grenzen. Schon die affine Transformation (KIRBY 1975) ergibt eine brauchbare Kartenanpassung. Für die Bild-zu-Bild-Anpassung wurden folgende Transformationen getestet (nach STEINER 1974):

- affine Abbildung (reine Drehung):

$$\begin{aligned}ia &= (jn - zj) * \sin(v) + (in - zi) * \cos(v) + zi \\ja &= (jn - zj) * \cos(v) - (in - zi) * \sin(v) + zj\end{aligned}$$

- allgemeine affine Abbildung:

$$\begin{aligned}ia &= a + b * in + c * jn \\ja &= d + e * in + f * jn\end{aligned}$$

- Polynomtransformation 2. Grades:

$$\begin{aligned}ia &= a + b * in + c * jn + d * in * jn + e * in^2 + f * jn^2 \\ja &= g + h * in + i * jn + j * in * jn + k * in^2 + l * jn^2\end{aligned}$$

Im alten System heissen die Bildkoordinaten (ia,ja), (in,jn) sind diejenigen des neuen. Für die Bestimmung des Drehwinkels (v) und des Drehzentrums (zi,zj) sind verschiedene Kriterien verwendet worden:

1. Drehwinkel aus den Bildkoordinaten der Spiegelpixel
Kap C.1.4 nach dem Prinzip der kleinsten quadratischen Abweichung (least square fit). Im Fall von

Transfor- mation Fig.	21c	21d	22a	22b	22c	22d
1	0.514	0.521	<u>0.529</u>	0.520	0.524	0.489
2	0.460	0.439	<u>0.446</u>	<u>0.501</u>	0.468	0.404
3	0.359	0.364	0.360	<u>0.376</u>	<u>0.392</u>	0.381
32x32	4	0.340	0.444	0.520	0.468	<u>0.493</u>
Pixel	5	0.535	0.559	0.583	0.561	<u>0.609</u>
Sub-	6	0.738	0.738	0.761	0.744	<u>0.772</u>
bilder	7	0.815	0.857	0.900	0.890	<u>0.902</u>
	8	0.616	0.560	0.567	<u>0.654</u>	0.630
	9	0.594	0.602	0.623	0.612	<u>0.596</u>
256x256						
Pixel	0.683	0.708	<u>0.730</u>	0.725	0.721	0.703

Tab. 9: Korrelationskoeffizienten zwischen Bild M2559 und N1518 (vergleiche dazu auch Fig. 21, 22 und 23), die maximalen Werte jeder Zeile sind unterstrichen:
 Fig. 21c: Translation
 21d: Drehung nach Spiegelpixel
 22a: Drehung nach Kursdifferenz (Bahnparameter)
 22b: Drehung nach Korrelationsmethode mit 9 Subbildern
 22c: Affine Transformation mit 3 Subbildern
 22d: Polynomtransformation 2. Grad mit 6 Subbildern

Transfor- mation Fig.	21c	21d	22a	22b	22c	22d
1	+1/-1	0/0	0/-1	0/-1	+1/-1	0/-1
2	-2/0	-1/+1	+1/0	+1/0	0/0	0/0
3	-2/+1	-1/+1	0/+1	+1/0	0/0	0/0
32x32	4	-1/+4	0/+3	0/+2	+1/+3	0/+2
Pixel	5	+1/+3	0/+2	0/0	0/+1	+3/-2
Sub-	6	-1/+1	-1/+1	0/0	0/0	0/0
bilder	7	-1/+1	0/+1	0/0	0/0	0/0
	8	0/0	0/+1	0/0	0/0	0/0
	9	-2/+1	-1/+1	0/0	+1/0	0/0
Resi- dual	47	23	7	14	7	14

Tab. 10: Abweichungen der Subbilder zwischen M2559 und N1518 in Pixel-Einheiten. Für die verschiedenen Transformationen, vergleiche Fig. 21 und 22, sowie Tab 9. Die Residuen sind definiert als die Summe aller Abweichungen im Quadrat.

Fig. 21a und 21b ergibt sich zwischen M2559 und N1518 ein Drehwinkel von 0.77381 Grad, Drehzentrum in Bildkoordinaten 1447/2833 (Differenzbild Fig. 21d).

2. Drehwinkel aus der Kursdifferenz beider Satellitenbahnen im Bildzentrum (nach TELESPAIO-Header).
Drehwinkel 1.2963 Grad, Zentrum 1142/1900
(Differenzbild Fig. 22a).
3. Drehwinkel aus 9 Subbildern nach Korrelationsmethode und "least square fit", Drehwinkel 1.3374 Grad,
Drehzentrum 1406/2836 (Differenzbild Fig. 22b).

Für die Bestimmung der Parameter a bis g der allgemeinen affinen Transformation sind für die Anpassung von Bild M2559 auf Bild N1518 die Subbilder 2, 7 und 8 ausgewählt worden. Es wurden 2 Gleichungssysteme mit je 3 Unbekannten gelöst. In der Transformation wurden dann die Lösungen als Parameter eingesetzt:

$$\begin{array}{lll} a = -29.6429 & b = +0.9929 & c = +0.0143 \\ d = +33.5476 & e = -0.0143 & f = +0.9952 \end{array}$$

Das Differenzbild nach erfolgter Transformation ist in Fig. 22c dargestellt.

Für die Polynomtransformation 2. Grades sind 6 Subbilder ausgewählt worden, nämlich 1, 2, 3, 4, 7 und 8. Die Lösungen von 2 Gleichungssystemen mit 6 Unbekannten ergaben für Bild M2559 folgende Transformations-Parameter:

$$\begin{array}{lll} a = +315.22863 & b = +1.76048 & c = -0.62142 \\ d = -0.00024 & e = -0.00002 & f = +0.00017 \\ g = -414.14170 & h = -0.07738 & i = +1.34511 \\ j = +0.00018 & k = -0.00016 & l = -0.00010 \end{array}$$

Für das Differenzbild vergleiche man Fig. 22d.

Sind bei zwei Satellitendurchgängen die Bahnen nur geringfügig verschieden, kommt man unter Umständen auch mit einfacheren Transformationen aus. Zwischen Bild N1392 und N1518 besteht eine Kursdifferenz von nur 0.007 Grad (Tab. 4), und die Bildkoordinaten sind nur um $x = -207$ und $y = -89$ verschieden. Mit einer einfachen Translation der Bildkoordinaten und einer

linearen Streckung von 3% in y-Richtung erreicht man eine gute Registrierung.

Für allgemeine affine Abbildungen und Polynomtransformationen höherer Ordnungen wird üblicherweise auch das Prinzip der "kleinsten quadratischen Abweichung" verwendet (KIRBY 1975), was aber bei unserem relativ kleinen Untersuchungsgebiet wieder zu Ungenauigkeiten führt. Mit 3 resp. 6 Vektoren (Abweichungen der Subbilder voneinander) erzwingt man genau dort (aber nur dort) eine exakte Überlagerung (Tab. 10). Für randlich gelegene Subbilder ist dieses Vorgehen ungünstig, wie z.B. Fenster Nr. 5 (Tab. 10, Kol. 22d) bei der Polynomtransformation 2. Grades und auch das Differenzbild Fig. 22d deutlich zeigen. Die "Residuale" von Kolonne 21d, 22c und 22d in Tab. 10 sind folglich nicht mehr eigentliche Restfehler, da nicht alle Fenster (Subbilder) in die Rechnung einbezogen wurden.

4.1. Beurteilung der Qualität der Bildregistrierung

Die Korrelationsrechnung liefert uns von den kleinen Bildteilen, die wir für die Erfassung der lokalen Translation benötigen, den Korrelationskoeffizienten. Dieser kann in Beziehung gesetzt werden mit den entsprechenden Ausschnitten im Differenzbild. Der Vergleich zeigt, dass unser Auge nicht unbedingt dort die beste Übereinstimmung "empfindet", wo auch der höchste Korrelationskoeffizient ermittelt wurde. Es werden dazu zwei Beispiele diskutiert.

Beispiel Subbild 4 und 7 (Fig. 23 - nördliche und südöstliche Ecke Murtensee):

Den höchsten Korrelationskoeffizienten zeigt die Polynomtransformation. Visuell wird dies anhand der Differenzbilder ohne weiteres bestätigt (Fig. 21 u. 22). Unser Auge reagiert offenbar sehr fein auf Kanten und urteilt deswegen differenziert.

Beispiel Subbild 5 (Fig. 23 - südlicher Teil zwischen Murten- und Neuenburgersee):

Von Auge beurteilt mag Fig. 22a oder Fig. 22b optimal sein. Die Korrelationsrechnung gibt aber der affinen Abbildung Fig. 22c mit einem Korrelationskoeffizient von 0.609 (Tab. 9) den Vorzug. Das Subbild sollte aber wie Tab. 10 zeigt noch um ein Pixel verschoben werden. (Der Korrelationskoeffizient wird vom optimal verschobenen Bild berechnet). Es scheint, dass die Stärke der digitalen Korrelation vor allem bei den kleintexturierten Bildteilen liegt, wo sie dem Auge offenbar überlegen ist.

4.2. Spiegelpasspunkte und digitale Bildkorrelation

Tab. 11 vergleicht die von einem Sonnenreflektor gekennzeichneten Bildelemente der Bilder M2559 und N1518. Beide Bilder sind zuerst durch Translation so überlagert worden, dass sie in Reflektorposition "A" gleiche Bildkoordinaten aufweisen. Abweichungen der Koordinaten gleicher Objekte (Spiegelpixel, Korrelationsfelder) zwischen den Vergleichsbildern verstehen sich in Pixel-Einheiten. In der Mitte der Korrelationsfelder befindet sich das entsprechende Spiegelpixel.

Es ist bemerkenswert, dass die digitale Korrelation in keinem Fall genau den gleichen Verschiebungsbetrag angibt wie die

Methode	Feldgrösse	Spiegel			
		A	B	C	D
nach Spiegel	1 Pixel	0/0	-1/-2	0/-1	-2/+2
nach Korrelation	16x16 Pixel	0/1	-1/1	+1/0	-1/+1
nach Korrelation	32x32 Pixel	0/1	-1/0	+1/0	-1/+1
nach Korrelation	64x64 Pixel	0/0	-1/0	+1/0	-1/+2

Tab. 11: Vergleich von Passpunktmethode mit Korrelationsmethode. Die Spiegelpositionen (Fig. 10) befinden sich im Zentrum der Korrelationsfelder.

Passpunktmethode. Je nach Grösse des Fensters kann die Abweichung um ein Pixel variieren. Dies lässt sich einerseits aus dem unterschiedlichen Texturgehalt des Korrelationsfeldes, aber andererseits auch durch die Bildgeometrie erklären.

Es bedarf noch weiterer Untersuchungen, um die optimale Fenstergrösse zu finden. Zu kleine Fenster können unter Umständen zu wenig Varianz aufweisen, d.h. das Korrelationsmaximum ist nicht mehr eindeutig. Zu grosse Subbilder erlauben es nicht mehr, "lokale" Unterschiede in der Bildgeometrie zweier zu vergleichender Bilder festzustellen.

4.3. Ergänzende Bemerkungen zu multitemporalen Daten

Die geometrische Anpassung von 4 zeitlich verschiedenen Bildern auf das Bild N1518 bedeutet, dass alle 5 Bilder identische Koordinaten erhalten müssen. Als Mass für die Gleichheit eines Bildpaares kann dabei die Korrelationsfunktion oder die Summe der Differenzen definiert werden. Ein visueller Eindruck der Differenzen gibt uns das Differenzbild. SVEDLOW et al. (1976) bezeichnen den Korrelationskoeffizienten als das zuverlässigste Mass für die Beurteilung der Gleichheit zweier Bilder. Der Korrelationskoeffizient entspricht der normierten Korrelationsfunktion, wie sie in Kap. C.3. verwendet wurde. Die Normierung erlaubt die Güte einer Bildregistrierung mit anderen Bildpaaren zu vergleichen. Unsere Bilder sind aber durch die Jahreszeit recht verschieden und zudem atmosphärisch nicht korrigiert.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass Korrelationskoeffizienten von weniger als 0.3 für unser Untersuchungsgebiet nur Scheinmaxima der Korrelationsfunktion sind. Aus Tab. 9 und Fig. 21 und 22 ersieht man auch, dass der Korrelationskoeffizient sich oft nur im Prozent- oder Promillebereich verbessert. Ein solcher Zuschlag kann aber, nach den Differenzbildern zu schliessen, eine wesentlich bessere Bildregistrierung bedeuten.

Die praktische Durchführung der digitalen Bildüberlagerung geschieht durch das Vereinigen von 4-Kanal-Landsat-Bilder zu einem $n \times 4$ -Kanal-Bild (n = Anzahl der zu überlagernden Bilder verschiedener Aufnahmetage). In unserem Fall entstand auf diese Weise ein 20-Kanal-Bild.

Diese Betrachtung führt uns zur Frage nach der Genauigkeit, mit der ein Bodenelement multitemporal erfasst werden kann. CICONÉ et al. (1976) untersuchten den Zusammenhang zwischen Fehlregistrierung und falschklassierten Pixel. Bildelemente aus der Mitte eines Feldes (reine Pixel), deren Messfläche nicht identisch ist (was bei zeitlich verschiedenen Überflügen auch nicht zu erwarten ist, Fig. 3) verbessern die Klassierung sogar. Anders sind Rand- oder Mischpixel zu werten. Ihre Messflächen erfassen jeweils zwei oder mehrere unterschiedlich genutzte Bodenflächen. Nach CICONÉ et al. (1976) führt dies zu falschen Flächenangaben. Wir sind diesem Problem dadurch begegnet, indem viele Nutzungskategorien definiert wurden. Wie eine Flächenüberprüfung zeigte, sind Mischpixel entweder richtig oder einer dritten nicht angrenzenden Kategorie zugeordnet worden. Mit Glättungsfilterung (Kap. E.5.) konnten viele, falsch klassierte Pixel "künstlich" eliminiert werden. Das theoretische Modell von CICONÉ zeigt bei Fehlregistrierung von einem Pixel bereits einen starken Abfall der Wahrscheinlichkeit, dass 2 Übergangspixel richtig klassiert werden. In der Arbeit werden aber nur 3 Kanäle untersucht. In unserem 20-Kanal-Bild wurde an den Feldergrenzen praktisch immer höchstens ein Pixel falsch klassiert (Farbtafel 3 im Anhang).

In der Fotografie reduziert die Überlagerung mehrerer "unscharfer" Bilder das Rauschen des Filmkorns. MARSHALL et al. (1975) haben ausgehend von dieser Idee nach Möglichkeiten gesucht, die Auflösung von Landsat-Bilder zu verbessern. Durch präzises Registrieren vom 4 Landsat-Bildausschnitten konnte nicht nur die Schärfe von Bildkanten- und Konturen gesteigert werden, sondern es wurde auch der Detailreichtum vermehrt. In unserem Fall erzielte man durch "Zusammenfassen" über eine

Klassifikation der 20 Kanäle zu einem Kanal offenbar einen ähnlichen Effekt.

Die Untersuchung zur Bildregistrierung hat gezeigt, dass für ein pixelgenaues Überlagern von Landsat-Daten von der uns zur Verfügung stehenden Qualität nur die digitale Bildkorrelation ein befriedigendes Resultat bringt. Mit dieser Methode wurden fünf zeitlich verschiedene Landsat-Bildausschnitte vom "Grossen Moos" einander überlagert. Der so entstandene multitemporale Datensatz wird in der Folge mit verschiedenen Klassifikationsalgorithmen den vorgegebenen Kategorien (Landnutzungstypen wie Mais, Wiese/Weiden, Gerste etc.) zugeordnet. Bevor wir auf das technische Vorgehen dazu eingehen, soll aber noch der Einfluss der Atmosphäre während der Satellitenüberflüge diskutiert werden.

D. DER EINFLUSS DER ATMOSPHERE IM TESTGEBIET

Zum Zeitpunkt der Auswertung unseres multitemporalen Datensatzes stand noch kein Korrekturprogramm für die Atmosphäre zur Verfügung. Als vorläufige Arbeitshypothese nahmen wir deshalb vergleichbare atmosphärische Bedingungen für alle bearbeiteten Datensätze an. Wir stützten diese Annahme mit der praktisch gleichen Horizontalsicht, die genau zum Zeitpunkt des jeweiligen Überfluges geschätzt worden war. Eine Ausnahme bildet der 18. September. Nach TURNER (1971) gilt die Horizontalsicht im sichtbaren Bereich als guter Parameter um den Dunst zu erfassen. Der Dunst liefert einen wichtigen Anteil an der Veränderung des Transmissionsgrades der Atmosphäre. Für die praktische Fernerkundung ist die Horizontalsicht ein genügend genauer Parameter für atmosphärische Korrekturen (TURNER et al. 1971).

Nach AHREN et al. (1977) ist ferner die Reflexion von Seen praktisch konstant und als Eingabe in Modellrechnungen geeignet. Zum gleichen Schluss kommt, gleiche Schwebestoff-Konzentration vorausgesetzt, auch STAENZ (1978).

1. VERGLEICHE VON LANDSAT-DATEN MIT BODENMESSUNGEN

Weil wir kein Atmosphärenmodell zur Verfügung hatten, um die Landsat-Daten radiometrisch zu korrigieren, versuchten wir den radiometrischen Einfluss mit Beobachtungen und Messungen an den Überflugstagen abzuschätzen.

Die nachfolgende Untersuchung erstreckt sich über:

- den Vergleich von Rohdaten mit vorverarbeiteten Landsat-Daten
- den Vergleich von zwei zeitlich praktisch identischen Datensätzen
- den Vergleich von Reflexionsmessungen am Boden mit Landsat-Daten.

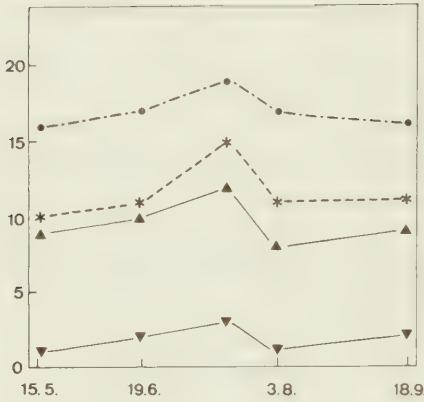
1.1. Vergleich von Rohdaten mit vorverarbeiteten Daten

Wir benützten für unsere Untersuchung vorverarbeitete Landsat-Daten (Kap.A.4.2.). Die Rohdaten wurden teils statistisch, teils mittels einer bordinternen Lichtquelle kalibriert. Es fragt sich, ob durch diese Manipulation die Rohdaten nicht derart verändert wurden, dass ein relativer Vergleich von einem Bild auf das andere nicht mehr möglich ist. Um dies nachzuprüfen, haben wir Rohdaten mit den entsprechenden vorverarbeiteten Daten verglichen.

Fig. 24 zeigt die gemittelten Messwerte von Landsat über 240 Pixel aus einer uferfernen Zone des Neuenburgersees (Fig. 10). Die Werte zu Fig. 24b stammen aus den von TELESPIAZIO (1976) vorverarbeiteten Daten. In Fig. 24a ist zum Vergleich auf die Rohdaten, so wie der Satellit sie zur Erde sendet, zurückgegriffen worden. Beide Kurven verhalten sich qualitativ gleich. Damit soll gezeigt werden, dass zumindest im unteren Messwertebereich mit beiden Daten gearbeitet werden kann.

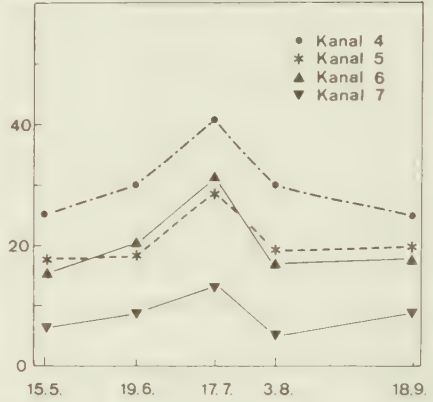
Um den oberen Wertebereich in der Messskala zu überprüfen, benutzten wir von unseren Bilddaten einen Videowert vom grossen Dach der Reithalle bei Muntelier. Ungeachtet des möglichen Scanlinieneffektes (Kap. A.4.2.) haben wir den höchsten Pixelwert von diesem mehrere Bildelemente

Videowert



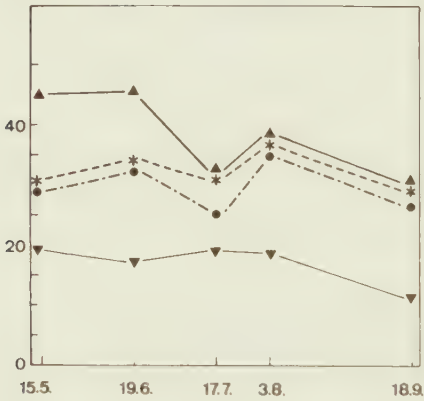
a)

Videowert



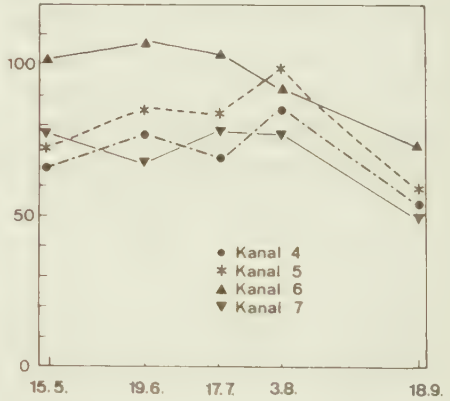
b)

Videowert



c)

Videowert



d)

Fig. 24: Vergleich von Rohdaten mit vorverarbeiteten Landsat-Daten (TIPS):
a) und b) Mittelwerte von 240 Pixel aus dem Neuenburgersee: a) Rohdaten b) vorverarbeitete Daten
c) und d) Höchster Messwert des Daches der Reithalle bei Muntelier: c) Rohdaten, d) vorverarbeitete Daten

überstrahlenden Objekt genommen und damit Fig. 24c und d zusammengestellt. In Fig. 24c sind die Rohdaten, in Fig. 24d wiederum die entsprechenden vorverarbeiteten Daten aufgeführt. Auch im mittleren bis oberen Messwertebereich verlaufen die Kanäle parallel zueinander. Eine Ausnahme bildet Kanal 6 vom 17. Juli. Sein Verhalten bleibt unklar.

Denkt man sich Fig. 24b auf Fig. 24d gelegt, erkennt man, dass sich Kanal 4 und Kanal 5 gegensinnig verhalten, d.h. dort wo im unteren Wertebereiche (Fig. 24a und b) ein Maximum auftritt, ergibt sich in den oberen Bereichen Fig. 24c und d) ein Minimum. Der Wertebereich ist in diesen Kanälen z.B. am 17. Juli deutlich kleiner als an den anderen Überflugstagen. Für die Qualität des Satellitenbildes bedeutet dies ein Verlust an Kontrast. Eine Erklärung des Phänomens liefern uns die Strahlungsmessungen, die ungefähr eine Stunde nach dem jeweiligen Satelliten-Überflug gemacht wurden.

		15. Mai	19. Juni	17. Juli	3. Aug.	18. Sept.
(E1)	K4	10.1	9.7	9.7	10.9	10.1
	K5	12.6	11.8	11.8	12.9	12.6
	K6	11.4	10.7	10.3	11.8	11.8
	K7	16.0	15.0	14.2	16.0	16.0
(E2)	K4	1.6	1.7	2.6	1.4	2.4
	K5	1.4	1.5	2.3	1.0	2.4
	K6	1.0	1.2	1.8	1.0	1.8
	K7	1.2	1.2	2.0	1.3	2.1

Tab. 12: Spektralmessungen der Atmosphäre ca. eine Stunde nach Landsat-Überflug in Watt/cm², Genauigkeit der Messung 10%:
(E1) direkte Sonnenstrahlung (inkl. Himmelsstrahlung), (E2) Himmelstrahlung

In Tab. 12 ist die direkte Sonnenstrahlung (inklusive Himmelsstrahlung) und die mit senkrechtgestelltem, abgeschattetem Radiometer (EXOTECH 100-A) gemessene Himmelsstrahlung zusammengestellt (Messtechnik: STAENZ 1976). Die Sonnenelevation ist also in Tab. 12 nicht berücksichtigt worden, um die direkte Strahlung vergleichbar zu machen. Aus Tab. 12 geht hervor, dass das Himmelslicht am 17.7. und am 18.9. deutlich stärker war als an den anderen Stichtagen. Da der Sonnenstand am 19.6. und am 17.7. praktisch gleich war, ist der Unterschied der reflektierten Strahlung offenbar der stärkeren Himmelsstrahlung zuzuschreiben. Die Aufnahme des Testgebietes erfolgte allerdings unter einem um 5.2 Grad verschiedenen Winkel. Weiter muss darauf hingewiesen werden, dass 2 der 5 multitemporal bearbeiteten Aufnahmen von Landsat-1 stammten und die anderen 3 von Landsat-2 (Tab. 4). Ein Unterschied zwischen den Daten konnte jedoch nicht festgestellt werden.

In diesem Abschnitt untersuchten wir das spektrale Verhalten von Wasser (Neuenburgersee) und des grossen Daches der Reithalle bei Muntelier und verglichen sie mit den Strahlungsmessungen der Sonne und der Atmosphäre, die vom Boden aus gemacht wurden. Von beiden Objekten lieferte Landsat trotz gleicher direkter Sonnenstrahlung und teilweise gleichem Sonnenstand verschiedene Messwerte. Der einzige von uns festgestellte Unterschied lag in der Himmelsstrahlung und im Abtastwinkel. Nicht bekannt ist aber, ob das Reflexionsverhalten unserer Objekte sich in der Zeit nicht verändert hat (beispielsweise die Turbidität des Sees).

Wir haben deshalb den Einfluss der Atmosphäre auf die vom Satelliten gemessenen Werte mit einer weiteren Methode zu überprüfen versucht. Dazu haben wir die entsprechenden Messwerte von zwei zeitlich praktisch gleichen Landsat-Aufnahmen verglichen.

1.2. Vergleich der Landsat-Aufnahmen vom 19. und 20. Juni

Zwei an aufeinanderfolgenden Tagen erhaltenen Bilder wurden multispektral miteinander verglichen. Die atmosphärischen Bedingungen waren an diesen beiden Tagen recht verschieden. Am 19. Juni 1976 war es wolkenlos und windstill bei 20 km Horizontalsicht. Am 20. Juni lag bei gleichen Sichtverhältnissen und auch bei Windstille ein Cirrus-Schleier über dem Testgebiet. Die feinen Eiswolken bewirkten offenbar eine Zunahme der Himmelsstrahlung (Tab.13). In Tab. 14 haben wir nicht

		19.Juni	20.Juni
(E1)	K4	9.7	10.0
	K5	11.8	12.6
	K6	10.7	11.8
	K7	15.0	15.0
(E2)	K4	1.7	3.9
	K5	1.5	4.0
	K6	1.2	3.5
	K7	1.2	4.4

Tab. 13: Spektralmessungen der Atmosphäre ca. eine Stunde nach Landsat-Überflug in Watt/cm², Messgenauigkeit 10%:
(E1) direkte Sonnenstrahlung (inkl. Himmelsstrahlung, (E2) Himmelsstrahlung

die einzelnen Messwerte beider Datensätze verglichen, sondern die Mittelwerte von ausgesuchten Landnutzungskategorien (Kap. E.1.). Es ist nämlich kaum zu erwarten, dass der Satellit bei zwei Überflügen exakt die gleichen Messflächen erfasst (Fig. 3). Wir nehmen an, dass sich die Reflexionseigenschaften aller Objekte zwischen den zwei Befliegungen nicht geändert haben. Zwischen den Aufnahmen fiel auch kein Niederschlag. Da die am Boden gemessenen Strahlungswerte (Tab. 13) stark voneinander

abweichen, erwarten wir auch einen Unterschied in den Satellitendaten.

	Kanal 4	Kanal 5	Kanal 6	Kanal 7
je 19 Werte	0.775	0.874	0.992	0.987
76 Werte	0.993			

Tab. 14: Korrelation von Stichprobenmittelwerte nach linearer Regression Fig. 26 in den einzelnen Kanälen (19 Werte) und gesamthaft (76 Werte)

Fig. 26 zeigt die Regressionsgerade über 19 Stichprobenmittelwerte aus den Datensätzen beider Tage. Am Y-Achsenabschnitt ersieht man, dass die Werte vom 20. Juni generell höher waren. Wenn es sich dabei aber um den Einfluss der Himmelsstrahlung handelt, sollte dieser Einfluss bei Kanal 4 am grössten und im Kanal 7 am geringsten sein. Dies ist jedoch nicht der Fall. Es muss deshalb noch nach anderen Einflüssen gesucht werden. Der Aufnahmewinkel differierte zwischen beiden Aufnahmen um rund 6.9 Grad. Ferner ist die Standardabweichung der 19 Stichproben gemessen an den Differenzen entsprechender Stichprobenmittelwerte gross. D.h. die Stichproben unterscheiden sich nicht signifikant. Ferner könnte sich die Nichtlinearität der Sensorempfindlichkeit bemerkbar machen (NASA 1972).

Ein charakteristischer Einfluss der Atmosphäre ergibt sich aus den Korrelationskoeffizienten, wie sie die lineare Regression liefert (Tab. 14). Der Koeffizient ist in Kanal 4 am kleinsten und in den Kanälen 6 und 7 deutlich höher.

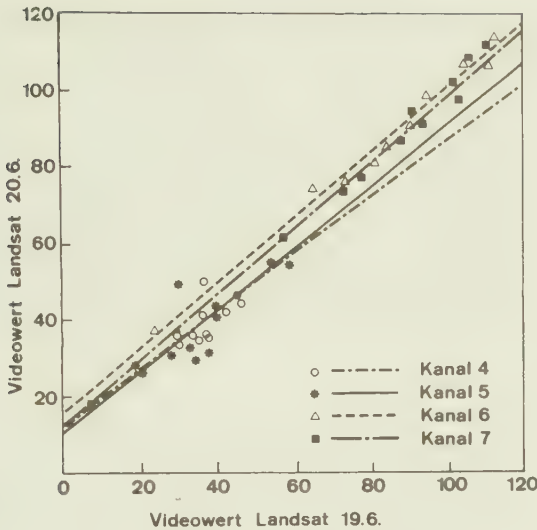


Fig. 26: Regressionsgerade gleicher Stichprobenmittelwerte für den atmosphärischen Vergleich der Landsat-Daten vom 19. und 20. Juni 1976

1.3. Vergleich radiometrischer Messungen am Boden mit Stichproben aus Landsat-Daten

Aus den vorangegangenen Kapiteln geht hervor, dass der Einfluss der Atmosphäre auf Fernerkundungsdaten komplex ist. In unserem Datensatz wäre, wie erwähnt, auch dem Aufnahmewinkel Beachtung zu schenken, da unser Testgebiet im Überlappungsbereich zweier Überflugsstreifen liegt (Fig. 12). In der Gegenüberstellung der Daten vom 19. und 20. Juni (Kap. D.1.2.) ist am 19. das Untersuchungsgebiet unter einem

Abtastwinkel (zur Vertikalen) von ungefähr 3.0 Grad (mit der Sonne) und am 20. unter einem Winkel von etwa 3.9 Grad (gegen die Sonne) aufgenommen worden. Die Differenz der Azimute (Sonne zu Abtastrichtung) betrug ungefähr 22 Grad. Nach TURNER (1971) hätte der Einfluss der Himmelsstrahlung aufgrund des Abtastwinkels beispielsweise bei 700nm Wellenlänge am 19.6. rund 10% höher sein müssen, als am darauffolgenden Tag. Da nun aber am 20. am Boden die höhere Himmelsstrahlung gemessen wurde, dürfte der unterschiedliche Abtastwinkel ausgleichend gewirkt haben.

Für unsere Untersuchung ist es wichtiger, den relativen Einfluss der Atmosphäre auf die zeitlich verschiedenen Aufnahmen zu erfassen. Die Frage ist, ob durch die Atmosphäre die vom Erdboden reflektierte Strahlung derart stark verändert wird, dass die Messwerte von Landsat nicht mehr mit Bodenmessungen verglichen werden können. Um dies zu überprüfen, haben wir während dem Überflug von Landsat am Boden an vier Testfeldern Reflexionsmessungen durchgeführt.

Die relativen Reflexionswerte (Kap. A.1.1.) wurden in Diagrammen mit den Mittelwerten entsprechender Stichproben aus



Fig. 25: Messvorrichtung für die relative Reflexion mit EXOTECH 100-A: Messhöhe ca. 4 Meter, Messfläche ca. 1 m²

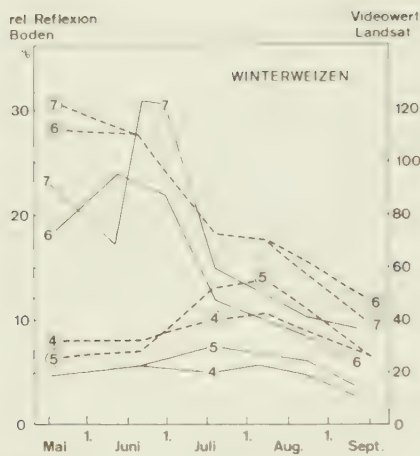
den Landsat-Daten verglichen. Man beachte, dass mehr Messungen am Boden als vom Satelliten aus gemacht worden sind.

In Fig. 27a ist das spektral-temporale Verhalten einer Testfläche in einem Winterweizenfeld dargestellt. Auffällig ist der Abfall der IR-Werte mit der Reife der Feldfrucht. Ebenfalls mit der Gelbfärbung der Getreidefelder wird der Messwert im Kanal 5 grösser als derjenige im Kanal 4 und zwar übereinstimmend in den Bodenmessungen und in den Satellitendaten.

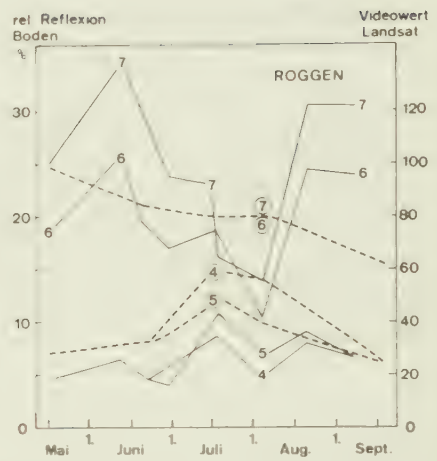
Fig. 27b vergleicht die Bodenmessung eines Testfeldes im Sommerroggen mit dem Mittelwert der Stichprobe "Roggen" aus den Satellitendaten (Winter- und Sommerroggen). Im IR weichen die Verhalten voneinander ab. Das Absinken der Kurve gegen die Erntezeit hin ist aus den Satellitdaten nicht, oder nur in sehr geringem Mass, ersichtlich. Die Zusammenfassung von zwei Kategorien mit unterschiedlichem Erntetermin könnte der Grund für das abweichende Verhalten sein. Die Kanäle 4 und 5 zeigen hingegen ein typisches Verhalten für Getreide.

Fig. 27c stellt Messdaten von Mais dar: Die Bodenmessung zeigt immer höhere Werte im Kanal 7 als im Kanal 6. Der Stichprobenmittelwert der Satellitendaten von Kanal 7 ist jedoch nur in der zweiten Jahreshälfte höher als in Kanal 6. Der zeitliche Verlauf der Kurven in Kanal 6 und 7 ist sonst aber wiederum ähnlich. Die Kanäle 4 und 5 korrelieren in beiden Messungen hoch, verlaufen allerdings etwas verschieden voneinander.

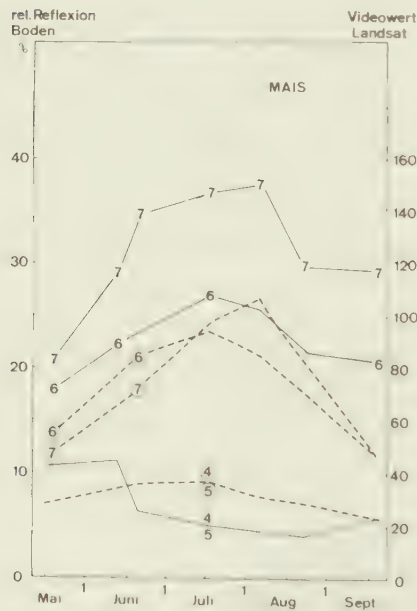
Fig. 27d zeigt die Stichprobenmittelwerte und Bodenmessungen der Kategorie Weiden und Wiesen. Die Stichprobe umfasst sowohl bewässerte als auch (wegen der grossen Trockenheit) ausgetrocknete Wiesen. Die Bodenmessung wurde auf einer Testfläche in einem unbewässerten Wiesenstück durchgeführt. Ein starkes Absinken des IR-Kanals 7 und ein gleichzeitiges Ansteigen der Kanäle 4 und 5 sind an einem Datum zwischen zwei Landsat-Überflügen festgestellt worden. Auch bei dieser



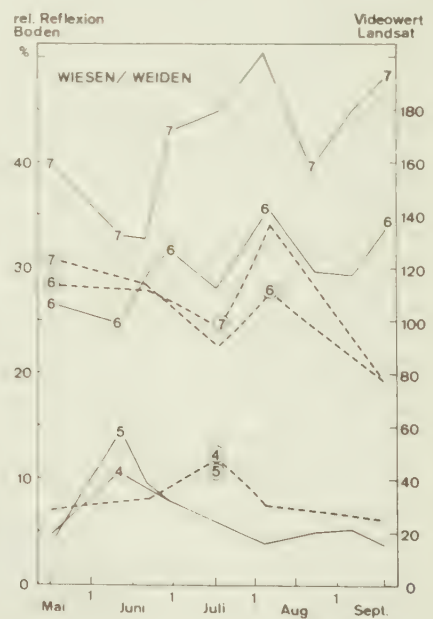
a)



b)



c)



d)

Fig. 27: Spektral-temporales Verhalten von einigen Landnutzungstypen im Vergleich relativer Reflexion von Bodenmessungen mit absoluten Messwerten (Stichprobenmittelwerte) von Landsat

4——7 Kanäle Bodenmessung

4----7 Kanäle Landsat

Kategorie verlaufen beide Messungen ungefähr parallel.

Im allgemeinen weichen die absoluten Messwerte in ihrem Verhalten nicht oder nur in geringem Mass von den am Boden gemessenen relativen Reflexionswerten ab. Der Einfluss der Atmosphäre kann damit als vergleichbar angenommen werden. Wie sich beim Klassieren des multitemporalen Datensatzes zeigte, verbesserten auch die September-Daten, trotz der ungünstigen, atmosphärischen Bedingungen das Klassifikationsresultat weiter. Das vorgängige Umrechnen der Bilddaten mittels eines Atmosphärenmodells in relative Reflexionswerte, wie es STAENZ (1978) vorschlägt, ist sicher bei stark verschiedenen atmosphärischen Bedingungen für eine multitemporale Bildinterpretation erfolgsversprechender, als das Verarbeiten unkorrigierter Daten. Man kann erwarten, dass eine radiometrische Korrektur die Stichproben im Variablenraum (Fig. 8) besser trennbar macht; eine unter Umständen auftretende, starke Streuung innerhalb von Stichproben kann damit jedoch nicht verhindert werden.

Wir erachten aus oben erwähnten Gründen den atmosphärischen Einfluss auf unsere Daten als vergleichbar und werden im nächsten Kapitel den multitemporalen Datensatz radiometrisch unkorrigiert klassieren.

E. KLASSIFIKATION VON MULTITEMPORALEN MSS-DATEN

1. ALLGEMEINES ZUR KLASSIFIKATION

Mit der Klassifikation ordnet man jedes Bildelement, das durch seine Variablen (Kanäle) gegeben ist, derjenigen Kategorie zu, der es von seiner Eigenschaft her am nächsten liegt. Für

diesen Arbeitsschritt stützten wir uns auf die Klassifikationsalgorithmen, die sich an den Zürcher Hochschulen bereits in früheren Arbeiten bewährt haben (Anhang 3). Es sind alles sog. überwachte Klassifikationsverfahren (Kap. A.5.3.). In der Folge wird deshalb zuerst auf die Auswahl und die Erhebung von Stichproben eingegangen.

1.1. Festlegen der Kategorien

Mit der angestrebten Landnutzungskartierung möchte man möglichst jeden Nutzungstyp erfassen. In der überwachten Klassifikation (supervised learning) muss jeder dieser Typen vorgängig als Klasse oder Kategorie durch Stichproben definiert werden. Dies setzt voraus, dass sich alle Klassen in ihrem spektralen Verhalten während einer Wachstumsperiode unterscheiden lassen. Die Wahl der Kategorien unterliegt aber noch folgenden Kriterien:

- die geographische Orientierung auf dem Satellitenbild muss gewährleistet sein, um Felder mit bekannter Landnutzung für Stichproben zu eruieren
- von jeder Klasse müssen hinreichend grosse Stichproben (Anzahl Bildelemente) erhoben werden können.

Bei vielen Interpretationen von fernerkundlich erhobenen Multispektraldaten (BINZEGGER 1975, GFELLER 1975, NUESCH 1977) mussten für die Klassierung etliche Kategorien in Unterkategorien aufgeteilt werden, um bi- und trimodale Verteilungen innerhalb einer Stichprobe zu verhindern. Die Anzahl der Stichprobenelemente pro Kategorie blieb trotzdem hinreichend gross genug (Kap. A.5.5.3.).

In der vorliegenden Arbeit versuchten wir, Felder zu klassieren, die häufig weniger als 20 Bildelemente umfassen.

Hinreichend grosse (Kap. A.5.3.) und repräsentative Stichproben zu erheben, wird damit schwierig. Einige Nutzungstypen mussten wir aus Gründen der Stichprobengrösse zusammenfassen; dies waren die Kategorien Roggen (Winter- und Sommerroggen) und Raps (Raps und Rübsen). Für die wenigen grossen und die sehr vielen kleinen Gemüsefelder und für den Hafer konnten nicht genügend Stichprobenelemente gefunden werden. Die Kategorie Mais besteht aus Futter- und Körnermais. Bei den Kartoffeln erlaubte die Grösse und die Zahl der Felder nicht, zwischen Früh- und Spätkartoffeln zu unterscheiden.

Damit eine Stichprobe die Kategorie möglichst gut repräsentiert, wurden Felder mit unterschiedlicher Bodenqualität (Farbe) und Wachstumsbedingungen innerhalb einer Kategorie berücksichtigt. Es ist auch darauf geachtet worden, bei der Probenentnahme ebenfalls Bildelemente nahe der Feldergrenzen einzubeziehen, um eventuelle Überstrahlung durch Nachbarfelder zu erfassen. In Tab. 15 sind die ausgewählten Kategorien mit der Anzahl Stichprobenelemente aufgeführt.

Unsere Stichproben sind aus den erwähnten Gründen sehr klein. Die Voraussetzungen für eine statistische Untersuchung sind in strengem Sinn damit nicht mehr erfüllt. Dennoch mussten wir auf statistische Auswertungsverfahren, wie die schrittweise, lineare Diskriminanz-Analyse zurückgreifen, da geeignete Klassifikationsalgorithmen, die auf nicht-parametrischen Methoden beruhen, (noch) nicht zur Verfügung stehen.

1.2. Erhebung von Stichproben

Wegen der schlechten Auflösung von Landsat bereitet es Schwierigkeiten, die landwirtschaftlichen Felder im Satellitenbild aufzufinden, die während der Begehung ins Luftbild kartiert worden sind. Die Feldergrenzen erscheinen im Satellitenbild einmal in diesem, einmal in jenem Kanal deutlicher. Zudem ist es wegen der unterschiedlichen Bildgeometrie problematisch, Flächen oder Strecken vom

Luftbild direkt ins Satellitenbild zu übertragen. Die Karte lässt sich, wie experimentell nachgewiesen wurde, besser als das Luftbild mit dem Satellitenbild geometrisch vergleichen. Unsere im Feld erhobene Landnutzungskontrolle wurde deshalb in die Karte übertragen. Die vielen in der Karte 1:25'000 vermerkten Flurwege und Entwässerungsgräben im "Grossen Moos" erleichtern diese Arbeit erheblich.

Beim nachfolgend beschriebenen Vorgang geht es nun darum, die Stichprobenfelder in Satellitenbild-Koordinaten zu lokalisieren:

Auf dem Digitalisiertisch wurde die Karte in Landsat-Pixel zerlegt. Dies geschieht durch die Definition eines rechteckigen Koordinatennetzes mit dem Digitizer. Mit der bekannten Pixelgrösse von 56m x 79m (Kap. A.4.) ist das Koordinatennetz vorgegeben. Durch einen Passpunkt, der sowohl auf der Karte als auch auf dem Satellitenbild genau identifiziert wird, ist auch der absolute Bezug gewährleistet. Die von Spiegelreflektoren geblendeten Pixel (Kap. C.1.1.) erfüllen diese Voraussetzung vorzüglich. Durch die Wahl von zwei relativ entfernten Spiegelpixel erreichten wir zudem eine gute Massstabs-Anpassung. Weitergehende Karten-Satellitenbild-Korrekturen wurden in diesem Zusammenhang nicht ausgeführt. Mit dem Digitizer konnte jeder beliebige Punkt auf der Karte in Satelliten-Bildkoordinaten herausgelesen werden. Auf diese Weise bestimmten wir die Eckpunkte unserer (immer rechteckigen) Stichprobenfelder.

Mit Hilfe der Datenmatrix des Originalbildes (Beispiel in Fig. 15) musste die Lage der Stichproben noch überprüft werden. Dabei wurde kontrolliert, ob alle Stichprobenelemente wirklich innerhalb der ausgewählten Felder liegen.

Kategorie	Abkürzungen		Anzahl Stichprobenelemente
See	SEE	S	135
Schilf	CSC	C	33
Wald	WAL	W	98
Überbaut	DOR	D	38
Gerste	GER	G	30
Winterweizen	TWI	T	21
Sommerweizen	ZSO	Z	29
Roggen	ORO	O	40
Kartoffeln	KAR	K	26
Zuckerrüben	UZU	U	29
Raps	ARA	A	26
Wiese/Weide	RGR	R	32
Mais	IMA	I	39
Reben	NRE	N	22

Tab. 15: Die untersuchten Landnutzungskategorien und ihre Stichprobengrösse

2. KLASSIERUNG MIT DER SCHRITTWEISEN, LINEAREN DISKRIMINANZ-ANALYSE (BMD7MT)

Zur Klassierung von unserer multitemporalen 20-Variablenbild haben wir u.a. die schrittweise, lineare Diskriminanz-Analyse verwendet. Das entsprechende Programm BMD7MT (DIXON 1970), ist am Rechenzentrum der ETHZ implementiert worden. Neben dem oben erwähnten Prinzip des "supervised learning" bietet es eine Reihe von Optionen an, die es erlauben, die Klassierung in verschiedener Hinsicht zu beeinflussen:

- der Toleranzbereich bezüglich der Variablen lässt sich vorgegeben
- der Schwellenwert für die Gruppenzugehörigkeit kann variiert werden
- die Trennbarkeit der Kategorien lässt sich anhand von Kontrollklassifikationen beurteilen.

Das Programm ist besonders für die Verwendung von grossen Datenmengen (und vielen Kanälen) ausgelegt. Es setzt allerdings etwas Erfahrung für einen sinnvollen Einsatz der Optionen voraus.

Die Stichprobenwerte sind nun sowohl aus den Einzelbildern als auch aus einigen multitemporalen Bildkombinationen extrahiert worden, um damit den Klassifikator BMD7MT zu trainieren d.h. die Trennfunktion zu bestimmen. Zum Vergleich und zur Kontrolle haben wir alle Stichproben von Einzelbildern (monotemporal) und von den Bildkombinationen (multitemporal) wieder klassiert (Tab. 16 bis 18). Im nächsten Kapitel wird anhand dieser Kontrollklassifikationen die Trennbarkeit der einzelnen Kategorien in den verschiedenen Datensätzen (monotemporal und multitemporal) überprüft.

2.1. Vergleich der monotemporalen und multitemporalen Kontrollklassifikationen

Man konsultiere während der nachfolgenden Diskussion die Tab. 16, 17 und 18. Die Kategorien und ihre Abkürzungen ersieht man aus Tab. 15.

In die Kategorie SEE fällt sowohl das tiefere Wasser, als auch die seichten Uferpartien. Im Kanal 4 erreichen letztere relativ hohe Reflexionswerte (Fig. 17). Die Trennbarkeit der Seen gegenüber den anderen Kategorien bietet keine Schwierigkeiten.

SCHILF (CSC) ist als Klasse schwierig zu definieren. Je nach Verlandungsgrad spriesst viel Gras zwischen den Schilfhalmern. Mitte Sommer trocknet dieses aus, was spektral eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Getreide und im Herbst mit dem Mais ergibt (Juni, Juli und August Klassifikationsmatrix Tab. 16 und 17). Dank der späten Begrünungszeit, die zeitlich nahe der des Laubwaldes liegt und der ganzjährig geschlossenen Vegetationsdecke, wird das Schilf nur multitemporal gut erfasst.

WALD (WAL): In dieser Untersuchung ist der Wald nicht weiter aufgeteilt worden, was mit monotemporalen Daten zu vielen Fehlklassierungen führte. Die Kategorie "Wald" umfasst Bestände verschiedenen Alters, wie die Pappelpflanzungen im Chablais-Wald am Murtensee (Fig. 10), Auenwald und hohe Mischwaldungen, aber auch Fichtengehölz. Wie die Kontrollklassifikationen zeigen, besteht eine gewisse Affinität zwischen "Wald" und "Schilf", was auf ufernahen Auenwald schliessen lässt. Aus Tab. 16a und b (Mai resp. Juni) geht hervor, dass etliche Elemente der Stichprobe "Wald" bei der Kontrollklassifikation dem "Getreide" und "Mais" zugewiesen wurden. Bearbeitet man beide Daten gleichzeitig, also multitemporal, erhöht sich die Klassifikationsgüte von 72 resp. 70 auf 84 Prozent (Tab. 18).

Überbautes Gebiet (DOR): Diese Signatur erfasst eine lockere Siedlungsweise, die von Baumgärten durchsetzt ist. Spektral gesehen ist diese Kategorie zu allen Jahreszeiten uneinheitlich, was auch aus allen relativ schlechten monotemporalen Klassierungen hervorgeht. Die Zuverlässigkeit sinkt dabei auf minimal 32% ab. Multitemporal ist aber eine Abtrennung dieser Klasse von den anderen durchaus möglich.

GETREIDE: Es wurde versucht, das Getreide in die Kategorien Gerste (GER), Winterweizen (TWI), Sommerweizen (ZSO) und Roggen, meist Winterroggen (ORO) aufzuschlüsseln. Multitemporal gelingt die Trennung. Das schlechte Ergebnis der monotemporale Klassierung von "Gerste" lässt sich mit der unterschiedlichen Bodenfarbe der Stichprobenfelder erklären (Kap A.3.4.2.5.). Sommer- und Winterweizen sind zwischen Mai und August monotemporal schlecht und multitemporal nur mit geringer Zuverlässigkeit zu trennen. Vielleicht sollten noch April-Daten miteinbezogen werden.

KARTOFFELN (KAR): Hier sollte eigentlich zwischen Früh- und Spätkartoffeln unterschieden werden; monotemporal ist deshalb

	SEE	CSC	WAL	DOR	GER	TWI	ZSO	ORO	KAR	UZU	ARA	RGR	IMA	NRE	TOTAL
SEE	133	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	135
CSC	.	24	4	3	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	33
WAL	.	10	71	3	1	.	.	7	3	3	.	.	.	.	98
DOR	.	5	1	28	.	.	.	1	.	2	.	.	1	.	38
GER	.	2	.	3	3	4	6	4	.	.	.	7	.	1	30
TWI	.	.	.	.	.	10	4	3	.	.	.	4	.	.	21
ZSO	.	.	1	.	1	6	17	2	.	.	1	1	.	.	29
ORO	.	1	3	3	4	5	5	12	.	.	.	7	.	.	40
KAR	.	1	.	.	.	.	.	.	17	1	.	.	7	.	26
UZU	.	1	3	.	.	.	.	.	.	20	.	.	5	.	29
ARA	.	.	.	.	.	.	6	.	.	.	18	1	.	1	26
RGR	.	.	.	.	2	6	2	2	.	.	.	20	.	.	32
IMA	.	.	3	3	.	.	.	.	20	3	.	.	9	1	39
NRE	.	.	.	1	1	1	.	.	.	.	2	1	.	16	22

SEE CSC WAL DOR GER TWI ZSO ORO KAR UZU ARA RGR IMA NRE TOTAL

a)

	SEE	CSC	WAL	DOR	GER	TWI	ZSO	ORO	KAR	UZU	ARA	RGR	IMA	NRE	TOTAL
SEE	135	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	135
CSC	.	16	1	.	1	2	1	5	1	1	.	.	5	.	33
WAL	.	7	69	.	.	2	6	3	5	2	.	.	4	.	98
DOR	.	2	.	24	2	.	.	3	.	5	.	.	.	2	38
GER	.	2	.	3	5	.	1	.	.	.	4	6	.	9	30
TWI	.	.	.	.	.	12	3	1	5	.	.	.	.	.	21
ZSO	.	.	1	.	.	10	11	1	4	2	.	.	.	.	29
ORO	.	13	1	2	.	1	3	12	3	4	.	.	1	.	40
KAR	.	1	.	.	.	.	7	2	9	4	1	1	1	.	26
UZU	.	.	.	.	1	.	.	1	6	14	1	.	6	.	29
ARA	.	.	.	1	2	.	.	.	.	.	20	2	.	1	26
RGR	.	1	.	.	6	6	7	1	1	.	.	10	.	.	32
IMA	.	2	2	2	.	.	.	.	1	2	.	.	29	1	39
NRE	.	.	.	.	3	.	.	.	.	.	.	1	.	18	22

SEE CSC WAL DOR GER TWI ZSO ORO KAR UZU ARA RGR IMA NRE TOTAL

b)

Tab. 16 a und b: Kontrollklassifikation von Stichproben eines 4-Kanalbildes. Beispiel: Von total 26 Stichprobenelementen in der Kategorie "Raps" (ARA) sind wieder 18 Elemente "Raps" zugeordnet worden. Aufgrund der Distanz im Variablenraum (Fig. 8) sind 6 dem "Sommerweizen" (ZSO), 1 Elemente der Kategorie "Gras" (RGR), und 1 Pixel den "Reben" (NRE) zugewiesen worden. Abkürzungen Tab. 15
a) Klassierung von Landsat-Daten vom 15. Mai 1976
b) Landsat-Daten vom 19. Juni 1976

	SEE	CSC	WAL	DOR	GER	TWI	ZSO	ORO	KAR	UZU	ARA	RGR	IMA	NRE	TOTAL
SEE	135	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	135
CSC	.	9	5	.	.	.	3	5	4	1	.	.	2	4	33
WAL	.	2	69	1	.	1	.	.	4	6	1	.	14	.	98
DOR	.	1	.	14	5	1	4	5	3	.	.	.	.	5	38
GER	.	1	.	7	2	1	.	.	2	1	12	1	.	3	30
TWI	.	1	.	1	1	10	2	.	1	1	4	.	.	.	21
ZSO	.	2	.	.	.	7	14	.	3	1	1	.	1	.	29
ORO	.	2	1	6	8	6	2	2	2	1	1	2	1	6	40
KAR	.	.	.	.	.	1	2	.	1	1	9	.	12	.	26
UZU	.	.	.	.	.	2	3	1	2	12	.	4	5	.	29
ARA	.	1	.	.	2	4	2	.	.	.	17	.	.	.	26
RGR	.	4	.	.	.	.	.	.	3	9	.	8	8	.	32
IMA	.	4	2	.	.	.	1	2	1	3	.	.	26	.	39
NRE	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	21	22

SEE CSC WAL DOR GER TWI ZSO ORO KAR UZU ARA RGR IMA NRE TOTAL

c)

	SEE	CSC	WAL	DOR	GER	TWI	ZSO	ORO	KAR	UZU	ARA	RGR	IMA	NRE	TOTAL
SEE	133	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	135
CSC	.	8	.	.	1	.	.	6	6	1	.	1	8	2	33
WAL	.	2	88	.	.	.	1	.	1	.	4	.	2	.	98
DOR	.	2	.	12	4	5	3	1	10	.	.	.	.	1	38
GER	.	2	.	6	1	4	3	2	2	.	8	2	.	.	30
TWI	.	.	.	4	.	6	2	8	.	.	.	.	1	.	21
ZSO	.	.	1	2	2	3	11	7	1	.	1	.	1	.	29
ORO	.	3	1	2	.	.	1	24	4	.	4	.	.	1	40
KAR	.	1	.	2	4	.	2	.	.	5	8	2	2	.	26
UZU	.	5	.	1	.	.	.	.	2	12	.	9	.	.	29
ARA	.	.	.	.	.	.	.	.	3	.	23	.	.	.	26
RGR	.	2	.	.	.	.	.	.	.	4	.	26	.	.	32
IMA	.	5	1	.	1	.	.	.	1	2	.	1	26	2	39
NRE	.	.	.	1	.	.	.	1	.	2	.	3	1	14	22

SEE CSC WAL DOR GER TWI ZSO ORO KAR UZU ARA RGR IMA NRE TOTAL

d)

Tab. 16 c und d: Kontrollklassifikation von Stichproben
 c) Landsat-Daten vom 17. Juli 1976
 d) Landsat-Daten vom 3. August 1976

	SEE	CSC	WAL	DOR	GER	TWI	ZSO	ORO	KAR	UZU	ARA	RGR	IMA	NRE	TOTAL
SEE 134	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	135
CSC	.	15	1	.	2	2	.	6	.	1	.	.	6	.	33
WAL	.	14	60	.	9	3	.	1	.	.	5	.	6	.	98
DOR	.	3	.	24	.	4	.	7	.	.	.	.	.	.	38
GER	.	2	1	1	.	1	.	7	.	3	12	.	.	3	30
TWI	.	.	.	.	1	14	1	.	4	.	.	.	1	.	21
ZSO	1	2	1	.	3	.	8	.	3	1	8	1	1	.	29
ORO	.	2	.	6	2	2	.	17	.	1	.	8	.	2	40
KAR	1	1	.	.	.	1	2	.	12	.	6	.	3	.	26
UZU	.	1	.	1	.	1	1	1	.	14	.	10	.	.	29
ARA	.	.	.	.	1	.	3	1	7	.	14	.	.	.	26
RGR	.	.	.	.	.	.	.	3	.	9	.	20	.	.	32
IMA	.	12	1	.	.	.	8	5	8	3	.	.	2	.	39
NRE	.	.	.	2	.	.	.	2	.	.	.	1	.	17	22

SEE CSC WAL DOR GER TWI ZSO ORO KAR UZU ARA RGR IMA NRE TOTAL

a)

	SEE	CSC	WAL	DOR	GER	TWI	ZSO	ORO	KAR	UZU	ARA	RGR	IMA	NRE	TOTAL
SEE 135	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	135
CSC	.	30	2	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	33
WAL	.	9	82	1	.	.	4	.	.	.	.	.	2	.	98
DOR	.	2	.	27	1	.	.	.	.	5	.	.	3	.	38
GER	.	.	.	2	17	2	.	1	.	.	.	5	.	3	30
TWI	.	.	.	.	.	12	3	4	.	.	.	2	.	.	21
ZSO	.	.	2	.	.	7	17	2	.	.	1	.	.	.	29
ORO	.	.	1	3	.	.	5	29	.	2	.	.	.	.	40
KAR	.	1	.	.	.	.	.	.	21	3	.	.	1	.	26
UZU	.	.	3	.	.	.	.	.	4	18	.	.	4	.	29
ARA	.	.	.	.	3	1	.	.	.	.	21	1	.	.	26
RGR	.	.	.	.	6	7	.	1	.	.	.	18	.	.	32
IMA	.	3	2	2	.	.	.	.	1	2	.	.	29	.	39
NRE	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	1	1	.	19	22

SEE CSC WAL DOR GER TWI ZSO ORO KAR UZU ARA RGR IMA NRE TOTAL

b)

Tab. 17 a und b: Kontrollklassifikation von Stichproben
a) Landsat-Daten vom 18. September 1976
b) Multitemporal Mai/Juni-Daten (8 Kanäle)

	SEE	CSC	WAL	DOR	GER	TWI	ZSO	ORO	KAR	UZU	ARA	RGR	IMA	NRE	TOTAL
SEE	135	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	135
CSC	.	31	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	33
WAL	.	9	86	.	.	.	.	.	.	3	.	.	.	.	98
DOR	.	3	.	30	2	.	.	1	.	2	.	.	.	.	38
GER	.	.	.	2	22	2	.	3	.	.	.	1	.	.	30
TWI	.	.	.	.	.	15	4	2	.	.	.	.	.	.	21
ZSO	.	.	1	.	.	6	19	1	.	.	.	1	1	.	29
ORO	.	1	1	1	.	1	6	26	.	3	.	1	.	.	40
KAR	.	2	.	.	.	.	.	.	22	1	.	.	1	.	26
UZU	.	.	2	1	.	.	.	.	2	20	.	.	4	.	29
ARA	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	25	.	.	.	26
RGR	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	31	.	.	32
IMA	.	2	3	1	.	.	.	.	1	3	.	.	28	1	39
NRE	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	1	.	19	22
SEE CSC WAL DOR GER TWI ZSO ORO KAR UZU ARA RGR IMA NRE TOTAL															

c)

	SEE	CSC	WAL	DOR	GER	TWI	ZSO	ORO	KAR	UZU	ARA	RGR	IMA	NRE	TOTAL
SEE	135	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	135
CSC	.	32	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	33
WAL	.	5	93	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	98
DOR	.	1	.	37	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	38
GER	.	.	.	1	23	1	.	2	.	.	1	2	.	.	30
TWI	.	.	.	.	.	19	2	.	.	.	.	.	.	.	21
ZSO	.	.	1	.	.	3	22	2	.	.	.	1	.	.	29
ORO	.	.	.	1	.	.	.	37	.	2	.	.	.	.	40
KAR	1	.	.	.	.	.	.	.	23	.	.	.	2	.	26
UZU	.	.	.	1	.	.	.	.	1	26	.	.	1	.	29
ARA	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	25	.	.	.	26
RGR	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	32	.	.	32
IMA	.	3	2	.	.	.	.	.	1	.	.	.	31	2	39
NRE	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	22	22
SEE CSC WAL DOR GER TWI ZSO ORO KAR UZU ARA RGR IMA NRE TOTAL															

d)

Tab, 17 c und d: Kontrollklassifikation von Stichproben
 c) Multitemporal Mai/Juni/Juli-Daten (12 Kanäle)
 d) Multitemporal Mai bis September (20 Kanäle)

das Ergebnis mit Ausnahme des Mai-Bildes schlecht. Multitemporal ist das Resultat entschieden besser. Ein Vergleich mit der Gesamtklassierung (Farbtafel 3 im Anhang) zeigt, dass die Kontrollklassifikation zuverlässig ist.

ZUCKERRÜBEN (UZU): Diese Kategorie besitzt je nach Jahreszeit Ähnlichkeit mit verschiedenen anderen Landnutzungsarten. Im Frühjahr werden wegen der späten Begrünung Zuckerrüben-Stichproben dem "Mais" zugeordnet. Im Sommer gelangen etliche Elemente in die Kategorien der Getreide und im September werden wegen der immer noch fast bodenbedeckenen Vegetation die Zuckerrüben-Stichproben zu 50% den "Wiesen und Weiden" zugewiesen. Wegen des späten Erntezeitpunktes, kann die Zuverlässigkeit von 90% bei multitemporaler Klassierung als gesichert angesehen werden (Tab. 18).

RAPS (ARA): Es war schwierig hinreichend viele Stichprobenelemente für den Raps und die etwas später blühenden Rübsen zu finden. Am 15. Mai war der Raps praktisch verblüht, während die Rübsen in leuchtendem Gelb standen. Diese Kategorien können wahrscheinlich mit April- und Mai-Daten separat erfasst werden. Im Mai zeigt die Klassifikationsmatrix (Tab. 16a) Falschklassierungen in "Richtung" des Sommerweizens - im Juli (Tab. 16c) zum Getreide. Multitemporal (Mai bis Juli) klassiert, ist die Zuverlässigkeit von 96% erfreulich hoch (Tab. 18).

GRAS (RGR): Hier sind Weiden und Mähwiesen zusammengefasst. Bedingt durch die Trockenzeit in der ersten Jahreshälfte 1976 (Fig. 11b) schwankten die Reflexionswerte im nahen IR stark (Kap. D.1.3.). Weitere Unterschiede zwischen Weiden und Mähwiesen müssen wahrscheinlich durch das Heuen (geschnittenes trocknendes Gras, das auf dem Feld liegt) in Kauf genommen werden. Es ist nicht untersucht worden, wie weit Weiden und Wiesen sich mit Landsat-Daten trennen liessen. Gras ist im Mai und Juni ähnlich grün wie das Getreide. Im Juli wurden viele Elemente "Wiesen und Weiden" den immer noch grünen Feldfrüchten "Zuckerrüben", "Kartoffeln" und "Mais" zugesellt.

Im August 1976 war die Trennung der Kategorie "Wiesen und Weiden" wohl deshalb so gut möglich, weil durch den langersehnten Niederschlag die Matten sofort wieder zu grünen anfangen. Man vergleiche dazu auch die Farbtafeln 1 und 2 im Anhang. Multitemporal sind die Weiden und Wiesen mit grosser Sicherheit zu erfassen.

MAIS (IMA): Die beiden Anbauarten Futter- und Körnermais sind zusammengefasst worden. Beim Futtermais wird die ganze Pflanze verwendet. Er spriesst später, entwickelt aber mehr Laubwerk. Das Mai-Bild enthält von den Stichproben "Mais" praktisch nur die Bodenfarbe. Im Mai sind folglich nur ähnliche Bodentypen zusammengefasst worden, so auch einige bare Kartoffelfelder. Die Juni-Aufnahme brachte mit 74% Zuverlässigkeit eine relativ gute Abtrennung dieser Klasse. Im September ist "Mais" dem "Schilf" offenbar recht ähnlich. Das gleiche, allerdings in viel schwächerem Ausmass, zeigt die multitemporale Klassierung. Die Güte ist nur unwesentlich höher als im Juni (74% zu 79%). Wegen der späten Vegetationsbedeckung sollte entweder die Bodenfarbe in der Klassifikation mitberücksichtigt oder nur Bilder aus der zweiten Jahreshälfte ausgewertet werden.

REBEN (NRE): Diese Spezialkultur ist wegen der Hangexposition spektral schwierig zu erfassen. In jedem Monat unserer Untersuchung liessen sich "Reben" nur deshalb recht gut, multitemporal sogar zu 100% richtig klassieren, weil alle Stichproben von der gleichen Hanglage stammen.

Mit Hilfe der Stichproben von den obenbeschriebenen Kategorien entwickelte die Klassifikationsroutine BMD7MT die Diskriminanzfunktion. Mit den Kontrollklassifikationen, der Klassierung der Stichproben, erhalten wir ein Vertrauensmass für die Trennbarkeit der Klassen untereinander (Tab. 18). Im nächsten Schritt, der eigentlichen Klassierung des ganzen Datensatzes, wird jedes Bildelement (mit seinen Messwerten in den verschiedenen Kanälen) mittels Koeffizienten der Diskriminanzfunktion einer Kategorie zugeordnet.

Kategorie	monotemporal					multitemporal		
	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Mai+ Juni 8K	Mai- Juli 12K	Mai- Sept. 20K
See - lake	99	100	100	99	99	100	100	100
Schilf - reed	73	49	27	24	45	90	93	97
Wald - forest	72	70	70	90	61	84	88	95
Überbaut - built-up	75	63	37	32	63	71	79	97
Gerste - barley	10	17	7	-	-	57	73	77
Winterweizen - springwheat	48	57	48	-	-	57	71	90
Sommerweizen - summerwheat	59	38	48	-	-	59	65	76
Roggen - rye	30	30	5	-	-	73	65	93
Kartoffeln - potatoes	65	34	4	0	-	81	85	88
Zuckerrüben - sugar-beet	69	48	41	41	43	62	69	90
Raps - rape	69	77	65	-	-	81	96	96
Wiese/Weide - meadow-land	63	31	25	31	62	56	97	100
Mais - corn	23	74	67	67	5	74	72	79
Reben - vineyards	74	82	95	64	77	86	86	100
Getreide - cereals GER/TWI/ZSO/ORO	71	50	46	-	-	82	89	-

Tab. 18: Prozent-Anteil von Stichproben, die den vorgängig definierten Kategorien korrekt zugeordnet wurden. Klassierung mit schrittweiser, linearen Diskriminanz-Analyse (BMD7MT)

Durch Setzen einer Schranke lässt sich der "Einflussbereich" einer Kategorie limitieren (Fig. 8). Die Erfahrung mit BMD7MT zeigt, dass diese Schranken für die Klassierung unsere Stichproben und den ganzen Datensatz weit gesetzt werden müssen, weil sonst viele Bildelemente als nicht-klassierbar taxiert werden. Es wurde also versucht, praktisch alle Pixel einer Kategorie zuzuweisen. Als einzige Ausnahme sind Bildelemente zu nennen, die an einem der Überflugstage unter einer Wolke lagen. Die hohen Reflexionswerte beispielsweise in 4 der 20 Kanäle liessen die Gesamtdistanz für die betroffenen Pixel so stark anwachsen, dass die Bildelemente nicht mehr klassiert wurden.

3. KLASSIERUNG MIT DCLASS UND MCLASS

Als DCLASS und MCLASS sind zwei Algorithmen am Grossrechner der Universität Zürich im interaktiven Bildinterpretationssystem IBIS (FASLER 1978) implementiert worden.

Beim DCLASS, einer Zentroidmethode, kann durch Setzen von Schranken (thresholds) die Klassifikation beeinflusst werden. Die Erfahrung zeigt aber, dass das Limitieren einzelner Klassen andere Kategorien wieder ausweitet. Dadurch können vorher richtig zugeordnete Pixel in eine falsche Klasse gelangen. Das gezielte Setzen von Schranken erlaubt aber, zwei bestimmte Klassen zu separieren. Die Trennbarkeit der übrigen Kategorien kann deswegen jedoch unkontrollierbar werden.

Im Datensatz treten die Klassen "Schilf" (CSC), "Reben" (NRE) und "Wald" (WAL) mit relativ grosser Streuung als eine Art Mischpixel-Klassen auf. Viele falsch interpretierte Elemente, insbesondere solche an Feldergrenzen oder von kleinparzellierten Feldern, fallen in diese Kategorien. Mit einer Schranke beim Mass 30.0 konnten nach mehreren Versuchen viele Fehlklassierungen vermieden werden. Gesamthaft gesehen,

braucht man beim DCLASS etwas Erfahrung im Beurteilen der Trenndistanzen. Bei einer grösseren Zahl von Kategorien kann man dabei leicht die Übersicht verlieren.

Das MCLASS basiert auf der maximalen Mutmasslichkeit (maximum likelihood, FASLER 1978). Bei diesem Klassifikationsalgorithmus wird die Schranke in Vielfachen von Standardabweichungen gesetzt. Sie kann also nur gesamthaft für alle Klassen gegeben werden. Damit berücksichtigt man aber die Streuungen der Kategorien individuell. Wie schon beim DCLASS ist es auch hier nicht leicht, allen Klassen gerecht zu werden. Mit dem Standardabweichungs-Vielfachen von 5.3 ergab sich für die meisten Nutzungsarten in unserem Testgebiet eine akzeptable Zuordnungsgenauigkeit. Allein der "Wald" wird flächenmässig zu klein. Erst mit einem Vielfachen von 9.0 ergibt sich für unseren inhomogenen Wald ein gutes Resultat. Für das Getreide ist dann aber eine differenzierte Klassierung ausgeschlossen.

Das MCLASS macht von jeder Kategorie eine Achsen-Transformation. Die Kanäle werden damit gewichtet. Die Anzahl der benutzten Variablen wird verkleinert und damit die vom Klassifikator zu verarbeitende Datenmenge drastisch reduziert. Im weiteren erfahren wir, welche Kanäle spektral und temporal ein grosses Gewicht erhalten. Für unser multitemporales Vorgehen ist es wichtig, die beste Aufnahmezeit für eine bestimmte Landnutzungsart zu erfahren, die uns optimale Unterscheidungskriterien von den übrigen Kategorien liefern kann (STEINER 1960).

Die vom Programm MCLASS gerechnete Matrix der Gewichte (Koeffizienten) ist aber nicht einfach zu interpretieren. Beispielsweise erhalten von der Klasse "Gerste" Kanal 7 im Mai und die beiden IR-Kanäle im Juli am meisten Gewicht. Bei den Kategorien "Kartoffeln", "Zuckerrüben" und "Mais" beinhaltet Kanal 4 im Mai viel Information, obschon (oder vielleicht gerade weil) diese Felder dann praktisch noch vegetationslos sind. Bei "Raps" erhält ein Kanal im September am meisten

Gewicht, was aber offensichtlich keinen Sinn ergibt, denn diese Feldfrucht wird im Juli geerntet. Sommer- und Herbstdaten sind aber für die Trennbarkeit derjenigen Produkte wichtig, die erst später im Jahr reifen.

4. VERGLEICH DER KLASSIFIKATIONS-VERFAHREN

Es gibt unter anderem zwei Möglichkeiten, Klassifikationen von multispektralen Daten, die von verschiedenen Algorithmen durchgeführt worden sind, miteinander zu vergleichen. Man stellt bei gleicher Stichprobenvorgabe die Kontrollklassifikationen einander gegenüber oder man vergleicht die Resultate aus den Klassierungen des ganzen Datensatzes mit der Bodenkontrolle. Wir haben beides durchgeführt. Zuerst soll kurz auf die Herstellung des Datensatzes "Bodenkontrolle - ground truth" (Farbtafel 3) eingegangen werden.

4.1. Bodenkontrolle

Die Bodenkontrolle ist in einer Feldkampagne auf einem Luftbild erhoben und in die Landeskarte 1:25'000 umgezeichnet worden. Die Landnutzungseinheiten haben wir dann in Landsat-Pixel-Einheiten digitalisiert. Dabei verwendeten wir das gleiche Prinzip, mit dem auch die Stichproben bestimmt wurden (Kap. E.2.). Die Passpunkte, welche durch unsere Spiegelreflektoren exakt gegeben sind, dienten wiederum der Karten-Satellitenbild-Anpassung. Mit dem Programm "GEBIET" wurden die Eckpunkte der Felder in Bildkoordinaten erfasst (Anhang 3). "MAP" füllte die Felder mit der entsprechenden Signatur (Kap. E.1.).

4.2. Vergleich der Bodenkontrolle mit den Klassierungen

Die nach Kap. E.4.1. entstandene Datenmatrix der Bodenkontrolle konnte dem klassierten Bild überlagert werden. Die Bildregistrierung erfolgte mit der gleichen Methode, mit der auch der multitemporale Datensatz hergestellt wurde (Kap. C.3.1.). Beim anschliessenden, pixelweisen Vergleich der Bodenkontrolle mit den Resultaten verschiedener Klassierungen zeigten sich an vielen Grenzen, also an Übergängen von einer Landnutzungsart zur anderen, keine Übereinstimmung der Kategorienzugehörigkeit (Fig. 28). Es gelang uns nicht, die Registrierung von Satellitenbild und Karte mit Bodeninformation besser zu bewältigen; das klassierte Bild ist nämlich an den Übergängen von einem Feld zum anderen relativ "sauber". Der optische Vergleich anhand der Farbtafel 3 im Anhang ist hier zuverlässiger als der digitale.

	falschklassierte Pixel	in Prozenten der Gesamtheit gemäss Bodenkon- trolle
DCLASS	2260	47
MCLASS	2135	44
BMD7MT	1693	35
BMD7MT mit GLAETT	1254	26

Tab. 19: Vergleich der Verfahren anhand falschklassierter Pixel des ganzen Testgebietes, aber nur innerhalb der Bodenkontrolle. DCLASS = Zentroid-Methode, MCLASS = maximale Mutmasslichkeit, BMD7MT = schrittweise, lineare Diskriminanz-Analyse, GLAETT = Glättungsfilter

Die Menge der falschklassierten Pixel dürfen wir nach oben Gesagtem nur als relatives Mass für die Qualität einer Klassifikationsmethode werten. Relativ deswegen, weil es mit unseren Mitteln noch nicht möglich war, zwei Datensätze verschiedener Herkunft (klassiertes Bild und digitalisierte Karte mit Bodeninformationen) grenzengenau zu registrieren. Die Fehler entstanden vor allem durch das Digitalisieren auf der Karte.

Obwohl MCLASS der rechnerisch aufwendigste Klassifikationsalgorithmus ist, kommt in Tab. 19 MCLASS nicht als beste Methode heraus. Die Qualität der Klassifikation hängt natürlich nicht allein vom Klassifikator ab, sondern auch davon, wie repräsentativ die vorgegebenen Stichproben für die Klassen sind. Hier zeigt sich, dass die Methode der maximalen Mutmasslichkeit (MCLASS) empfindlicher auf kleine, schiefverteilte, ja teilweise bimodale Stichprobenmengen ist als BMD7MT (Kap. E.2.).

Die Verbesserung der Zuordnung "BMD7MT mit "GLAETT" in Tab. 19 erfolgte nur durch ein Bildgeneralisierungsverfahren. In Kap. E.5. wird darauf eingegangen.

4.3. Vergleich von MCLASS mit BMD7MT

Wie bei der schrittweisen, linearen Diskrimanz-Analyse (BMD7MT) wurde auch mit MCLASS eine Kontrollklassifikation mit den Stichproben durchgeführt. Interessant ist der Vergleich beider Verfahren bei gleicher Stichproben-Eingabe. In Tab. 20 werden ausgewählte mono- und multitemporal klassierte Kategorien einander gegenübergestellt.

Im allgemeinen sind die Unterschiede in der Kontrollklassifikation zwischen MCLASS und BMD7MT nicht gross. Es sind aber einige Ausnahmen zu erwähnen, so in der Juni-Bild-Klassierung die Kategorien "Winterweizen" und "Wiese/Weide". MCLASS erfasste 65% der "Wiese/Weide"-

```

WWWWWWWWWW----- RRRRR--R-RR RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRR--R---W---
WWWWWWWWWWWW----- RRR-----R RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRWWWWWWWW
WWWWWWWW-----W-----T----- RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRWWWWWWWW
WWWWWWWW--W--WW--WW-----II-- RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRWWWWWWWW
WWWWWWWW-----WW-----III-- R -AAAA- RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRWWWWWW
--WWWWWW--W-----RR--RRRR--AAAA--R RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRWWWWWW
--WWWW--O-O-RR--RRRR--RRRRRR--AAAA--R RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRWWWWWW
--WWWW--O-O-O--RRRRRR--RRRRRR--RRRR-- RRRRR--RRRRRR--WWWWWWWW
S-----WW--O-O-O--RRRR--RRRRRR--RRRRRRRR--RR--RRRRRR--WWWWWWWW
SSSS--WW--RR-----RR--RRRR--TTRRRRR-----G-G-RRRRRR--WWWWWWWW
SSSSS--WW--RRRR--RRRR--TTTT--RRR--G-RRR--WWWWWWWW
SSSSSS--WWWW--DDDD--RRRRRRRTTTTT--RR--KKKK--TT--G-RR--WWWWWWWW
SSSSSS--W-WWW--DDDD--RRRRRRRRRR--TT--RR--KKKKK--T-----G--WWWWWWWW
SSSSSSSS--C-WWW--DDDD--RRRRRRRRRR--RRRR--KKKKK--UUUJ--WWWWWWWW
SSSSSSSS--WWWW--DD--RRRRRRRRRR--RRRRRR--KKKKK--UUUU--WWWWWWWW
SSSSSS--WWWW--RR--RRRRRRRR--RRRRRR--KK--I--UUUUJ--WWWWWWWW
SSSSSS--WW--RRRR--RR--O-O-O-O--RRRRRR--UUUUJ--WWWWWWWW
SSSS--WWWW--G-RRRR--A--O-ZZ--RRRR--TTTT--UUUU--WWWWWWWW
SSSS--C--WW--GG-RR--III--AAA--ZZZ--RR--UU--TTTT--UU--WWWWWWWW
SSS-----WW--GG--RR--K-III--AAA--ZZZZ--UUUU--TTTT--WW

```

a)

```

WWWWWWWWWW-- --RR--III--RRR --RRRR--RRRR--RRRRRRRRRR--WWWWWWWW
WWWWWWWWWW--W-----III--R RRRRRRRRR--RRRRRRRRRR--WWWWWWWW
WWWWWWWW--WWWW-- --III-- AA RRRRR--RR--RRRR--RRRR--WWWWWWWW
--WWWWWWWWWW-- --III-- AAA-- RRRRRRRRRRRRR--RRRR--WWWWWWWW
--WWWWWWWWWW--O--RR--R R AA-- RRRRR--RR--RR--RRRR--WWWWWWWW
--WWWWWWWW--O-O-O-O-O-O-O-O-O-O--RRR--A-- --RR--RR--RRRRRR--WWWWWWWW
--C--WWWWWW--O-O-O-O--RRRR--R--RRRR-- --RR--R--R--RRRR--WWWWWWWW
--W-WWW--O-O--R--R--RRRR--RRRR-- --G--RRRR--WWWWWWWW
SS--C-WW--O-O--DD--RRRRRR--R-RR--T--GGG--RR--WWWWWWWW
SSSS--C-WWW--DDDD--RR--RR--TTTT--R-R-K--TTTGGG--RRRR--WWWWWWWW
SSSSS--WW--DDDD--RR--R--TTTT--RR--KKK--TT--GG--WWWWWWWW
SSSSSS--CW--W--DDDD--RRRRRR--RR--KKKK--U--GG--WWWWWWWW
SSSSSSSS--WW--DDDD--R--RRRR--RR--R--K-K-K--UUUJ--GGG--WWWWWWWW
SSSSSSSS--WW--W-D--DDDD--R--RR--RR--O--R--RR--KKK--UUJ--GGW--WWWWWWWW
SSSSSS--WW--W--RRRR--RR--O--RRRR--K--UUUJ--WWWWWWWW
SSSSSS--C--W--RRRR--R-A-O-O-O--RR--R--UUUJ--WWWWWWWW
SSSSS--C-C--WW--Z--R--I--AA--O-O--Z--RRRR--UU--WWWWWWWW
SSSS--C--WW--G-RR--III--AAA--ZZZ--RR--U--WWWWWWWW
SSS--C--WW--IIIGGG--I-III--AA--ZZZZ--UUUU--WW--D
S--CCC--C--WII--GGG--KK-III--AAA--Z--UUUU--W--D

```

b)

```

WWWWWWWWWW----- -----I-RRRR RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRR--R-RR--WWW-WWWW
WWWWWWWWWW--W-----II-RR RRRRR--RRRRRRRRRR--RRR--WWWWWWWW
WWWWWWWWWW--WW-----III-- -- RRRR--R--RRRRRRRRRR--WWWWWWWW
WWWWWW--WW--WW-- --III-- AAAAA- RRR--RRRRRRRRRRRRRRRR--WWWWWWWW
WWWWWWWWWW--WW--W--R-IIIR R AAAA-A- RRRRRRRRRRRRRRRRRRRRRWWWWWWWW
C--WWWWWW--WW--O-O-O--R-RRRR--RRRRRR AA--A R RRRRRRRRRRRRRRRRRRR--WWWWWWWW
--CC--WWWWWW--O--O--RRRRRR--RRRRRR AA--RRR RRRRRRRRRRRRRRR--WWWWWWWW
--CCC--WWWW--O--O--RRRRRR--RRRRRR RR--RR--RRRRRRRRRRRR--WWWWWWWW
--C--WW--O--R--R--RRRRRR--RRRR-- --GG--RRRRRRRRRRRR--WWWWWWWW
--CCC--WW--D--RR--RR--RRRRRR--TTTT--RRRRRR--TTT--GG--RRRR--WWWWWWWW
--S-C-WWW--D--DDDD--RRRRRRTTTTT--RR--KKK--TTTGGG--RRRR--WWWWWWWW
--S-C-WWW--D--DDDDRRRRRRRRRR--TTTT--RR--KKKKKTTT--GGG--R--WWWWWWWW
--WW--D--DDDD--RRRRRRRRRR--T--RRRRKKKKKK--T--UUUG--GG--WWWWWWWW
--CCCWW--D--DDDD--RRRRRRRRRR--RRRRRR--KKKK--UUUUJ--G--WWWWWWWW
--WWWW--RRRRRRRRRR--RRRRRR--KKK--UUUUJ--C--WWWWWWWW
--WW--RR--RRRRRRRR--O-O-O-O--RRRR--I--UUUU--WWWWWWWW
--WW--R--Z--RRRR--R-AA-O-O-O--Z--RRRR--TTTT--UUUUJ--WWWWWWWW
--WW--RRRR--III--AAA--ZZZ--RRRR--U--TTTT--UUUU--WWWWWWWW
--CCC--WW--GGG--RR--III--AAA--ZZZZ--RRUUUU--TTTT--UUWWWWWW--D
--S--CC--C--CC--WW--GGG--RR--KK-III--AAA--ZZZZ--UUUUU--TTTT--WW--D

```

c)

Fig. 28: Pixelweise Vergleich der Resultate von Klassierungen mit der Bodenkontrolle: minus (-) bedeutet falsch klassiert, ein Buchstabe bedeutet richtig zugeordnet, weiss ist ohne Bodenkontrolle. Abkürzungen in Tab. 15.
a) DCLASS, b) MCLASS, c) BMD7MT

Kategorie	Mai (M) (B)		Juni (M) (B)		Mai+Juni (M) (B)		Mai bis Sept. (M) (B)	
Wald	74	72	76	70	85	84	99	95
Winterweizen	68	48	34	57	94	57	100	90
Zuckerrüben	79	69	72	48	90	62	100	90
Wiese/Weide	50	63	65	31	84	56	100	100
Mais	20	23	56	74	87	74	100	79

Tab. 20: Prozent-Anteil von Stichprobenpixel, die den Kategorien korrekt zugeordnet wurden. Vergleich zwischen der schrittweisen, linearen Diskriminanz-Analyse (B) und MCLASS (M)

Stichprobenelemente richtig, BMD7MT nur 31%. Für "Winterweizen" verhält es sich gerade umgekehrt. Multitemporal, also mit zunehmender Variablenzahl (bei gleichbleibender Stichprobenzahl) ist die Zuordnung beim MCLASS fast durchwegs besser. Damit erhebt sich die Frage nach einem objektiven Vergleichsmass. Ein solches ist wohl nur in der direkten Konfrontation eines klassierten Datensatzes mit der Bodenkartierung zu finden.

Wie alle vergleichenden Beispiele zeigen, hat sich für unsere gezwungenermassen kleinen Stichproben der Klassifikator BMD7MT am besten bewährt. Wir haben deshalb das Resultat dieser Dateninterpretation weiter untersucht und auch als Farbbild (Farbtafel 3) dargestellt.

Eine kurze Betrachtung gilt noch der Möglichkeit, Flächenmessungen auf dem Satellitenbild durchzuführen. Als Beispiel haben wir die Mais-Anbaufläche der Domäne Witzwil genommen.

4.4. Flächenvergleich "Mais" und "Wald" nach Bodenkontrolle mit klassiertem Bild (BMD7MT)

Der Anbauplan und die Feldgrößen der Domäne Witzwil sind uns genau bekannt (Mitteilung von Herrn Käser, Witzwil). Es soll deshalb der Versuch gemacht werden, die Anbaufläche von Mais mit Landsat-Daten abzuschätzen und sie mit den wirklichen Flächen am Boden zu vergleichen.

Maisfeld Nr.	Fläche (ha) n. Anbauplan	Anzahl Pixel	Fläche nach LANDSAT (ha)
5	6.06	17	7.5
11/12/13/14/15	30.28	69	30.5
28	2.50	1	0.6
114	6.23	0	0
62/63/64	12.58	26	11.5
85/90	23.35	54	23.9
100	16.76	29	12.8
116d	2.16	0	0
Total	99.92	196	86.8

Tab. 21: Anbauflächen von Mais 1976 auf der Domäne Witzwil. Vergleich Anbauplan mit der Klassierung von Landsat-Daten (nach BMD7MT)

Jedem Pixel entspricht eine Bodenfläche von 79m x 79m. Wegen der gegenseitigen Überlappung der Pixel ist aber jeweils nur 56m x 79m pro Bildelement einzusetzen. Wie Tab. 21 zeigt, lässt sich der flächenmässige Mais-Anbau auf 86% genau erfassen. Es war zu erwarten, dass bei der Auflösung, wie sie uns Landsat liefert, kleine Felder nicht oder zu klein erscheinen. Wie schon in Kap.E.3. erwähnt, sind die Kategorien "Mais" und "Schilf" recht ähnlich. Feld Nr. 114 wurde denn auch als "Schilf" klassiert, und weitere 17 Bildelemente im

Schilfgürtel am Neuenburgersee sind als "Mais" bewertet worden. Insgesamt sind auf der Domäne Witzwil 94.3 ha Mais erkannt worden, davon sind aber 7.5 ha Schilf. Feld Nr. 100 ist wegen eines angrenzenden Windschutzwäldchens (Mischpixel) zu klein kartiert. Zählt man hier die offensichtlich falschklassierten Elemente hinzu, kommt man auf eine Feldgrösse von 16.8 ha (effektive Fläche nach Anbauplan: 16.76 ha).

Erstaunlich gut ist die Waldfläche des Schwarzgrabenwaldes (Fig. 10) erfasst worden: 178 Pixel wurden gezählt, was einer Fläche von 78.7 ha entspricht. Der Wald bedeckt in Wirklichkeit 79 ha (Mitteilung vom Kreisforstamt Seeland). Der Staatswald (Fig. 10) ist durch die schmale Form schwieriger zu erfassen; er wurde mit 120 ha um 9 ha zu hoch angegeben. Seine Fläche beträgt 111 ha. Eine Analyse des Waldes, unterteilt in Laub, Misch- und Nadelwald etc. muss gesondert durchgeführt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Kategorie zu einer Klasse zusammengefasst, dabei entstand eine statistisch ungünstige, stark streuende Klasse. Viele falschklassierte Elemente im ganzen Testgebiet, vor allem aber Mischpixel, sind der Klasse "Wald" zugewiesen worden.

5. GLAETTUNG DER KLASSIERTEN BILDDATEN

Einzelne fehlklassierte Bildelemente, insbesondere an den Grenzen zwischen zwei Kategorien, lassen das klassierte Bild unruhig erscheinen. Mit einem Filter, der digital über die Bildmatrix geschoben wird, kann eine gewisse Glättung oder Generalisierung des Bildeindrucks erreicht werden. Am Bildinterpretationssystem IBIS ist ein Glättungsfilter implementiert worden (ITTEN und FASLER 1979). Wir benutzten dazu eine 3x3 Filtermatrix von gleichwertigen Zahlen, also einen sog. Homogenisierungsfiler. In jeder Position des Filters auf dem Bild wird das Zentrumspixel mit der Umgebung

F. DARSTELLUNG VON RASTERDATEN

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Herstellung einer thematischen Karte der Landnutzung für das Jahr 1976 eines Testgebietes im "Grossen Moos".

Die bildmässige Darstellung von flächenhaft erfassten und klassierten Daten kann auf verschiedene Weise erfolgen:

- Als Zahlenmatrix: die Videowerte werden bildkoordinatengerecht ausgedruckt (Fig. 15 und 16 als Beispiele von Originalbildern).
- Mit Symbolen: statt Zahlen können Buchstaben-Symbole gewählt werden (Fig. 29, Beispiel eines klassierten Bildes).
- Durch mehrfaches Überdrucken von Schriftzeichen: die Unterscheidbarkeit ist erleichtert durch die optisch Gewichtung. 6 bis 8 Stufen lassen sich unterscheiden.
- Durch Strichdarstellungen: jeder Kategorie wird ein individuelles Raster von beliebigen Symbolen zugeordnet (ITTEN 1980).
- Als Graustufen auf einem Filmraster: 6 bis 8 Stufen können unterschieden werden.
- Mit Farben: bis zu 20 Farbtöne kann man darstellen.

Je nach Fragestellung und Art der Aussage wird man die Computerresultate als Zahlenmatrix, Charakter- oder Symboldruck, Schwarz-Weiss-Film oder Farbdarstellung

wiedergeben. Das farbige Bild hat gegenüber der schwarz-weissen Darstellung den Vorteil, dass man viele Kategorien "gleichzeitig" in einem Bild darstellen kann. Es wirkt deshalb übersichtlicher und spricht den Interpreten besser an. Der Vergleich zwischen Bodenkontrolle und Klassifikationsresultat wird erleichtert. Wir haben uns dafür die farbige Darstellung der Resultate entschlossen.

1. FARBDARSTELLUNG VON MULTISPEKTRALDATEN UND VON KLASSIERTEN BILDERN

Um die Information aus multispektralen Daten bildmässig zu rekonstruieren, wird häufig die Farbfotografie verwendet. Sie erlaubt drei Spektralkanäle oder Kanalkombinationen in den drei Druckfarben Purpur (magenta), Blau-Grün (cyan) und Gelb (yellow) additiv darzustellen.

Für eine farbige Wiedergabe sind drei Schwarz-Weiss-Auszüge sowie ein Strichfilm für die Beschriftung nötig. Die Daten von drei Kanälen einer multispektralen Aufnahme liefern, auf Film belichtet (PHOTOMATION), diese Vorlagen (Kap. F.1.1, Farbtafel 1 und 2). Es entstehen Bilder mit kontinuierlichen Farbtönen.

Zur Darstellung von klassierten Bilddaten werden diskrete Farbtöne benutzt. Zuerst wird eine Zuordnungstabelle "Landnutzungskategorie-Farbtone" festgelegt. Aus dieser Tabelle werden die Belichtungswerte jeder Kategorie für die 3 Auszüge herausgelesen. In Tab. 22 bedeutet Null "kein Licht", der Film wird an dieser Stelle transparent, 255 "maximales Licht", die optische Dichte beträgt dort rund 2.5, der Film wird also schwarz.

Die Angabe der Farbfilter in Tab. 22 beziehen sich auf die additive Belichtung der schwarz-weissen Filmvorlagen, wie sie im Positivprozess mit dem CIBACHROME-A Print System erfolgt.

Kategorien	PHOTOMATION-Werte für die Belichtung Auszug für		
	Blaufilter	Grünfilter	Rotfilter
See	0	0	255
Schilf	0	150	255
Wald	255	150	255
Überbaut	255	255	107
Gerste	255	77	77
Winterweizen	255	107	0
Sommerweizen	255	0	0
Roggen	120	0	0
Kartoffeln	255	255	255
Zuckerrüben	120	0	77
Raps	70	107	0
Wiese/Weide	255	0	255

Tab. 22: Lichtintensitäten für die Aufbelichtung
(PHOTOMATION) von drei Schwarz-Weiss-Filmen als
Farbauszüge für die farbige Darstellung der
Klassifikationsresultate

In der oben beschriebenen Weise sind die im Anhang dargestellten Farbtafeln hergestellt worden. Im folgenden Kapitel werden sie beschrieben und mit Bodenbeobachtungen in Beziehung gebracht.

1.1. Bemerkungen zu den Farbtafeln 1 und 2: Landsat-Bild- ausschnitte "Grosses Moos" Mai bis September 1976

Die zu diesem Kapitel gehörenden Farbtafeln 1 und 2 findet man im Anhang. Sie zeigen die 5 Landsat-Bildausschnitte des Testgebietes "Grosses Moos", wie sie als multitemporaler Datensatz in der vorliegenden Arbeit für die Klassierung der Landnutzung verwendet wurden. Die Farbbilder sind so entstanden, dass jeweils die Kanäle 4, 5 und 7 in der ganzen Dynamik ihrer Messwerte linear auf Film belichtet wurden; d.h. unabhängig von der Häufigkeit der auftretenden Messwerte sind

sie in gleichmässigen Stufen von Grauwerten dargestellt worden (Fig. 30). Dabei wies man den tiefsten gemessenen Werten jedes Spektralkanals den gleichen, niederen Belichtung auf Film zu. Die höchsten Werten erhielten jeweils die gleiche Maximalbelichtung. Durch diesen Dynamik-Ausgleich versuchten wir den Einfluss der Atmosphäre zu reduzieren; die Farben aller Bilder werden damit untereinander besser vergleichbar. Die schwarz-weissen Filmvorlagen von Kanal 4 wurden durch einen Blaufilter, die von Kanal 5 durch einen Grünfilter und die von Kanal 7 durch einen Rotfilter additiv auf CIBACHROME-A Farbpapier belichtet. Damit entsprechen die Bilder farb- und spektralmässig ungefähr konventionellen Falschfarbenaufnahmen.

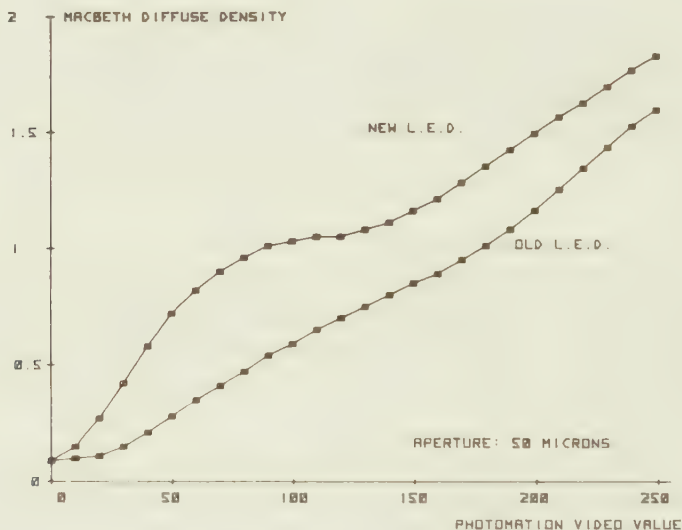


Fig. 30: Beziehung zwischen Videowerten von PHOTOMATION und Filmdichten (n. FUNKHOUSER 1978)

Farbtafeln 1 und 2 sind auch den herkömmlichen Luftbild-Interpretationsmethoden zugänglich. Für die Bodenkontrolle vergleiche man sie mit Farbtafel 3 unten. Interessant ist es, die Abfolge der Bilder zeitlich zu betrachten: der schnelländernde Landschaftsaspekt durch den wirtschaftenden

Menschen kann heute offenbar auch vom Weltraum aus verfolgt werden.

Generell erscheinen Flächen in kräftigem Rot, je vitaler die Vegetation ist. Schwärzliches Rot deutet auf ein nicht vollständig den Boden bedeckendes Blattsubstrat hin (Fig. 5). Es ist häufig eine keimende, gelegentlich auch eine reifende Feldfrucht. Braun oder Rot-Braun kann auf reduziertes Wachstum hinweisen. Die Wälder sind häufig dunkelrot-braun. In hellem bis weisslichem Blau erkennt man helle, praktisch vegetationslose Felder, z.B. Felder auf ehemaligen Sanddünen (Kap. B.1.), wie südlich von Witzwil und solche auf Hanglehmen am Fuss des Mt. Vully (Fig. 9 und 10). Im gleichen Hellblau werden Weiler, grosse, landwirtschaftliche Gebäudekomplexe, Dörfer und Strassen wiedergegeben. Die Seen und der Broye-Kanal erscheinen dunkelblau. Dunkelblau und dunkelgrün bis fast schwarz kommt auf den Falschfarbenbildern die dunkle, humusreiche Erde heraus, wenn sie noch (oder erneut) brach liegt.

In der Folge wird auf die einzelnen Bilder eingegangen. Es werden die meteorologischen Voraussetzungen umrissen und versucht, die gleichzeitig gemachten Beobachtungen während der Feldbegehungen anhand der Farbänderungen im Satellitenbild beschreibend zu erklären.

Farbtafel 1a (N1392):

15. Mai 1976. Wetter: windstill, Horizontalsicht 15 km, wolkenlos.

Die Rübsenfelder stehen in voller Blüte, die Rapsfelder sind an diesem Tag schon leicht verblüht. Die Hackfrüchte- und Maisfelder sind praktisch noch ohne Vegetation. Der Sommerweizen und Sommerroggen bedecken den Boden bereits vollständig, stehen aber nur ca. 20 cm hoch.

Im Farbbild fallen die orange-gelben Flächen der blühenden Rübsenfelder und gerade verblühte Rapsfelder (im Bild helles Rot) auf. Schwarz oder schwarzgrün sind die Felder von Hackfrüchten und Mais. Der Winterweizen und die Wiesen

erscheinen in kräftigem Rot, der Sommerweizen und Sommerroggen ist dunkelrot.

Farbtafel 1b (M1427):

19. Juni 1976. Wetter: windstill, Horizontalsicht 20 km, wolkenlos.

Der Mais steht 60 bis 80 cm hoch, der Boden ist stark ausgetrocknet. Die blattbedeckende Fläche beträgt 60 bis 70%. Die Wiesen sind geschnitten worden; wegen der herrschenden Trockenheit sind sie abgesehen von einzelnen grünen Löwenzahn-Büschelein gelb. Der Sommerweizen steht 70 bis 90 cm hoch. Schon leicht grün-gelb ist der Winterweizen; er ist bereits verblüht.

Im Farbbild sind die Maisfelder dunkelgrün geworden. Die geschnittenen Wiesen erscheinen hellbraun. Sommerweizen erkennt man jetzt am kräftigem Rot. Der Winterweizen ist dunkelrot geworden. Die Raps- und Rübsenfelder sind immer noch orangerot bis weisslich im Satellitenbild. Der Mischwald ist dunkelrot, aber je nach Anteil der Laubbäume stärker rot (z.B. der Chablais-Wald, Fig. 10).

Farbtafel 2a (N2542):

17. Juli 1976. Wetter: schwacher Wind, Sicht 20km, wolkenlos. Der Mais hat eine Höhe von ca. 150 cm erreicht, er blüht, die Erde weist handtiefe Risse auf. Die unbewässerten Wiesen sind nur etwa zu 70% grün. Das Getreide ist grün-gelb geworden. Auf dem Satellitenbild von diesem Tag werden die Mais- und Zuckerrübenfelder durch helles Rot herausgehoben; im gleichen Farbton erscheinen auch die wenigen bewässerten Wiesen und kleinen, ebenfalls bewässerten Gemüsefelder. Das Getreide ist dunkelgrün bis blaugrün. Abgeerntete Raps- und Rübsenfelder und das reifende Getreide können auf dem Farbbild nicht unterschieden werden; die Wiesen erscheinen graurötlich.

Die Trockenheit endete vom 17. auf den 18. Juli (Fig. 11b). Zwischen dem 1. und 16. Juli fielen in Witzwil 12.7 mm an zwei Regentage. In der Periode zwischen dem 17. und 31. Juli gab es 99.9 mm Niederschlag auf 10 Tage verteilt.

Farbtafel 2b (M2559):

3. August 1976. Wetter: schwacher Wind, Horizontalsicht 20km, 4/8 cirrus fibratus gegen NW.

Der Mais steht ca. 180 cm hoch und ist noch grün. Das Wintergetreide ist bereits geerntet, das Sommergetreide steht noch. Auf manchen geschnittenen Feldern liegt das Stroh in Reihen. Die Wiesen sind nach erfolgtem Regenfall saftig grün. Im Farbbild gelingt es nicht, das bereits geerntete Wintergetreide vom noch stehenden, reifen Sommergetreide zu unterscheiden; nur der etwas spätere Sommerroggen ist in diesem noch nicht ganz reifen Zustand sehr dunkelgrün. In leuchtendem Rot erscheinen jetzt wieder die Wiesen. In gleichem Farbton erkennen wir auch die Zuckerrübenfelder. Um diese Jahreszeit lässt sich, nach unserer Bildfolge zu schliessen, der Wald am besten abgrenzen. Er ist als Mischwald natürlich auch jetzt nicht homogen.

Farbtafel 2c (N1518):

18. September 1976. Wetter: windstill, Horizontalsicht 2km, 1/8 cumulus humilis.

Der Mais ist reif geworden. Die Wiesen sind mehr oder weniger unverändert grün.

Auf dem Farbbild haben sich die Wiesen gegen Dunkelrot hin verfärbt, was als ein Hinweis auf den stark herrschenden Dunst (oder vielleicht auf die erneute Trockenheit) gedeutet werden kann. Nur wenig dunkler im Farbton sind die Zuckerrüben geworden, sie unterscheiden sich aber von den Maisfeldern deutlich. Die Juli-September-Datenkombination ist offenbar geeignet, um Mais und Zuckerrüben auszuscheiden, zumindest im Jahr 1976. Die Farbbänderung der abgeernteten Getreidefelder ist noch zu beachten. Viele dieser Felder sind inzwischen umgepflügt worden.

1.2. Bemerkungen zur Farbtafel 3: multitemporale Klassifikation

Für eine farbige, kartenmässige Darstellung ist das Resultat der Klassierung nach der schrittweisen, linearen Diskriminanz-Analyse BMD7MT (Kap. E.3.) ausgewählt worden. Es wurde zusätzlich mit einem Filter geglättet (Kap. E.5.). Für den Vergleich ist dem klassierten Bild ein in Landsat-Pixel-Einheiten digitalisierte Bodenkontroll-Karte beigelegt worden (Kap. E.4.1.).

Um die verwirrende Vielfalt der meist kleinen, von der Bodenkontrolle nicht erfassten Felder auszuschalten, maskierten wir während des Aufbelichtungsprozesses das klassierte Bild durch die Flächen der Regionen mit Bodenkontrolle, d.h. es wurde pixelweise geprüft, ob eine Bodenkontrolle vorhanden sei. Wo dies nicht der Fall war, wurde das Element unklassiert (weiss) abgebildet. Dieses Vorgehen erleichtert den Vergleich zwischen klassiertem Bild und Bodenkontrolle wesentlich. Die Flächen der Felder und Wälder können jedoch nur dort verglichen werden, wo sie nicht (wie an den Rändern) eventuell durch die Bodenkontrolle beschnitten wurden.

1.3. Bemerkungen zur Farbtafel 4: "Grosses Moos" 1976, Darstellung der Hauptkomponenten

Die Korrelationsmatrix zeigt, dass die Messungen der vier Landsat-Kanäle nicht unabhängig voneinander sind. Die Kanäle 4 und 5 und die Kanäle 6 und 7 korrelierten in unserem Datensatz mit wenigen Ausnahmen höher als 0.9. Eine Reduktion der Daten wäre aus diesem Grunde sinnvoll. Nach READY et al. (1973) kann sie durch eine Hauptkomponenten-Transformation erreicht werden. Im Variablenraum werden neue Achsen (Komponenten) bezüglich der Messdaten (Videowerte des Satelliten) mit folgenden Eigenschaften definiert:

- Die Komponenten sollen keine Korrelation aufweisen.
- Die Elemente sollen inbezug auf die Komponenten eine maximale Varianz haben. Die Varianz ist relativ zur ersten sog. Hauptkomponente am grössten und nimmt mit jeder weiteren Komponente ab. Diese steht jeweils senkrecht zur vorhergehenden. Die erste Komponente besitzt also am meisten "Information", was in Prozentanteilen am sog. Eigenwert (Tab. auf Farbtafel 4) angegeben werden kann.

Am interaktiven Bildinterpretationssystem IBIS ist eine solche Möglichkeit zur Analyse programmiert worden. Die drei ersten Hauptkomponenten haben wir mit Farben dargestellt. Die Farbzuordnung ist aus der Tabelle auf der Farbtafel 4 ersichtlich. Es bleibt nun dem Interpretieren überlassen, die entstehenden Misch-Farben den einzelnen Kategorien zuzuordnen. Dazu kann er die Farben bekannter und im Bild identifizierter Stichprobenfelder benützen. Ob sich aber die Farben der zu kartierenden Kategorien nicht überschneiden, ist erst aus dem Farbbild zu ersehen. In unserem Beispiel ist dies leider recht häufig der Fall. Es müssen also Kategorien zusammengefasst werden. Man vergleiche dazu die Bodenkontrolle auf der Farbtafel 3.

Für eine Hauptkomponenten-Analyse haben wir zwei temporal verschieden zusammengesetzte Datensätze gewählt: eine Kombination der Mai- und Juni-Multispektraldaten (2 Satellitenaufnahmen), mit der Idee, das Getreide unter Umständen schon vor der Ernte im Bild sichtbar zu machen und damit zu kartieren und eine Kombination von 5 Bildern vom Mai bis in den September. Letztere beinhaltet die gesamte multispektrale Information des Jahres 1976 von unserem Testgebiet. Es wäre erwünscht, sie über eine Hauptkomponenten-Analyse und eine farbige Darstellung einer analogen Interpretation zugänglich zu machen.

Die Hauptkomponenten-Analyse nach READY et al. (1973) ist also eine Vorverarbeitungsstufe von Bilddaten, die unüberwacht und getrennt von einem geschulten Interpreten z.B. in einem Rechenzentrum ablaufen kann. Der Interpret erhält nach der Analyse ein Farbbild einer Kanalkombination von nicht nur 3 (Farbtafel 1 und 2), sondern wie etwa in unserem Fall von 8 resp. 20 Kanäle zur analogen Auswertung.

Die beiden Bilder auf der Farbtafel 4 im Anhang werden in der Folge farblich beschrieben und mit der Bodenkontrolle (Farbtafel 3) und Feldbeobachtungen verglichen.

Hauptkomponentenbild Mai/Juni:

Laub- und Nadelwald sind auf dem Bild trennbar: gelb und grün-gelb wird der Laub- und Mischwald, hellgrün der Nadelwald. Mais ist relativ homogen, meist dunkelgrün. Uneinheitlich sind die Zuckerrübenfelder. Sommerweizen ist gelb oder gelb-grün, dem Wald recht ähnlich. In deutlich blasserer, grünlicher Tönung erscheint der Winterweizen und der Winterroggen. Keine eindeutige Farbe kann der Gerste zugeschrieben werden. Die Kartoffelfelder sind auffällig orange. Die Farbe der hellen Erde, wie auch die des Rapses, könnte man mit einem hellen Violett beschreiben. Die Wiesen und Weiden sind uneinheitlich gelb, rötlich-gelb bis helles Violett. Die gleichen Farbnuancen weisen zuweilen auch Raps, überbautes Gebiet und die helle Erde auf.

Gesamtheitlich gesehen kann man mit Vorbehalt die Maisfelder und Kartoffelfelder erkennen. Nicht alle Getreidearten können erfasst werden. Vermutlich wegen der Trockenheit sind die Wiesen nur bedingt zu unterscheiden. Allgemein wirkt die Bodenfarbe stark auf das Bild ein, so z.B. die Sanddüne von Witzwil.

Hauptkomponentenbild Mais bis Sept.:

Mais erscheint in hellem Grün, ist aber im Farbton etwas gelblicher als Wald. Einheitlich sind auch die Zuckerrübenfelder in Gelb bis Rot-Gelb, aber den Wiesen und Weiden ähnlich.

Getreide erkennt man allgemein an den dunklen blau bis violetten Farbtönen. Sommerroggen ist aber, wie die Wiesen und Weiden, meist rötlich. Raps ist uneinheitlich wegen der frühen Erntezeit, und auch die Kartoffelfelder sind nicht alle in gleicher Farbe abgebildet. Die Wiesen und Weiden sind gelb bis rot-gelb, ähnlich dem Sommerroggen und den Zuckerrüben.

Die 3 ersten Hauptkomponenten von 20 Variablen (Kanäle) verbessern gegenüber der Mai/Juni-Analyse (8 variablen) die Möglichkeiten der Interpretation erheblich. Etliche unserer für eine überwachte Klassifikation definierten Kategorien lassen sich kartieren. Mit Vorbehalten können farblich unterschieden werden: die Getreidefelder, die Wiesen und Weiden, der Wald und die Maisfelder.

Diese Beispiele zeigen, dass die einfache Hauptkomponenten-Transformation nur bedingt für eine bessere Interpretation eines multitemporalen Datensatzes geeignet ist. KAUTH et al. (1976) gehen in ihrer Untersuchung weiter und verbinden die Transformation der Daten mit Reflexionseigenschaften des Bodens. Messdaten der Bodenreflexion in den vier Landsat-Kanälen werden in bezug auf ihre erste Hauptkomponente untersucht und die Eigenvektoren als Gewichte für die Landsat-Messdaten genommen. So entstehen von diesen Daten transformierte Werte, die etwas über die Bodenfarbe ("brightness") aussagen. Die zweite Hauptkomponente wird in Richtung eines Vegetations-Clusters angelegt. Dieser Cluster kommt durch gemessene Erfahrungswerte der Reflexion von grüner, vitaler Vegetation zustande. Mit den Gewichten dieser Komponente werden die "Grün-Anteile" ("green stuff") aus den Satellitendaten extrahiert. Die dritte Hauptkomponente schliesslich liefert den "Gelb-Anteil" ("yellow stuff"). Er wurde aus Messungen an Getreide-Feldern gewonnen. Als vierte Hauptkomponente wird die übrige Information in einem Landsat-Bild gewertet ("non such").

ABOTTEEN (1978) braucht den erwähnten Vegetationszeiger der zweiten Hauptkomponente, um Getreide (small grain) von

Nichtgetreide zu trennen. Daten verschiedener Überflüge derselben Wachstumsperiode werden transformiert und in einem Eigenvektor-Zeit-Diagramm (Trajektorien) verfolgt. Jeder Eigenvektor stellt den aus vier Kanälen gewonnenen "Grün-Anteil" eines Bildes dar. Solche Darstellungen von Trajekturen des "Grün-Anteils" erlauben das Wachstumsstadium zu verfolgen und zu vergleichen. Man hofft zudem auf diesem Weg den günstigsten Zeitpunkt für die Datengewinnung zu finden. Für eine multitemporale Analyse von grossen Gebieten ist eine Datenreduktion, z.B. durch eine gezielte Auswahl der Aufnahmezeitpunkte und der Spektralkanäle, aus rechentechnischen Gründen wünschenswert.

G. AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass es mit den vier Spektralkanälen und einer Zeitreihe von 5 Aufnahmen vom Erderkundungssatellit Landsat möglich ist, die meisten landwirtschaftlichen Anbauprodukte auf grösseren Feldern zu erfassen und, unter Vorbehalt des Auflösungsvermögens, auch ihre Fläche zu bestimmen.

Unsere Untersuchung beschränkte sich aber auf ein begrenztes Testgebiet im flachen Gelände. Die Einflüsse des Reliefs auf Fernerkundungsdaten und die Höhe über Meer (Verschiebung des Wachstumskalenders) fielen damit weg. Ferner kann wegen der örtlichen Änderung der atmosphärischen Bedingungen die Interpretation von Bilddaten nicht auf ein beliebig grosses Gebiet ausgedehnt werden. Alle diese Probleme bedürfen noch weiterer Untersuchungen. Mit einer zusätzlichen Expositions- und Höheninformation für jedes Bildelement oder für kleine Bildteile, könnte beispielsweise eine Klassierung der Daten spezifisch erfolgen.

Der genaue Bezug von Satellitenbildern zur Karte ist für unser Gebiet noch nicht gelöst. In Anlehnung an Arbeiten von KOSNECNY (1976), abgetastete Bilder den Gauss-Krüger-Koordinaten anzupassen, wäre es wünschenswert, uns auf Landsat-Bildern in Koordinaten der Landeskarte orientieren zu können. Statt Passpunkte zu verwenden, könnten markante Konturen wie Seen oder Wälder aus der Karte mit dem Satellitenbild digital korreliert werden. Damit wäre es möglich, die Änderung im spektralen Verhalten eines bestimmten Punktes auf der Erde ohne Orientierungsprobleme zu verfolgen. Eine Stichproben-Erhebung, etwa nach TRACHSLER (1978), könnte dadurch erheblich erleichtert werden. Operationelle Auswertungen für eine Landnutzungserhebung sind jedoch kaum anders zu bewältigen als auf einem leistungsfähigen interaktiven Bildinterpretationssystem mit grosser Speicherkapazität und Bildschirmmonitoren.

Bedingt durch das Auflösungsvermögen von Landsat-1 bis -3, können wir heute keine kleineren Flächen als 79x79 m² erfassen. Jedoch schon Landsat-D wird vermutlich ab 1981 oder 1982 mit einem 7-Kanal-Abtastgerät (thematic mapper) Daten mit einer Bodenauflösung von 30x30 m² liefern. Der französische Satellit SPOT soll nach 1984 ausgewählte Gebiete sogar bis 12m auflösen in der Lage sein (CNES 1977).

Einerseits wird also die Auflösung von Satellitendaten spektral und auch räumlich immer besser, andererseits werden Speicher- und Verarbeitungstechniken nicht nur verfeinert, sondern auch billiger. Es ist deshalb zu erwarten, dass zukünftig für Landnutzungsinventuren und Kartennachführungen vermehrt Daten benutzt werden, die vom Weltraum aus erfasst worden sind.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit Multispektraldaten vom Erderkundungssatelliten Landsat-1 und Landsat-2 ist eine Landnutzungskartierung in einem Testgebiet im "Grossen Moos", Schweiz (ca. 47N, 7E) durchgeführt worden. Es wurden dazu nicht nur eine einzelne Aufnahme verwendet, sondern die Daten von 5 Landsat-Überflügen während der ganzen Vegetationsperiode 1976. Durch die digitale Auswertung nach der sog. multitemporalen Methode, konnte die Anzahl der getrennt erfassbaren Landnutzungskategorien erheblich gesteigert werden.

Bildregistrierung

Um einen multitemporalen Datensatz herzustellen, mussten vorrangig die 5 Landsat-Bildausschnitte digital überlagert werden. Dazu sind 3 Verfahren angewendet worden:

- die Passpunktmethode
- die visuelle Differenzbildanalyse
- die digitale Bildkorrelation.

Mit künstlichen Passpunkten (Spiegelreflektoren) versuchten wir die Bildgeometrie genau zu erfassen. Die Auswertung des Experimentes zeigt aber, dass solche Passpunkte zur Bestimmung einer präzisen Bildregistrierung wenig geeignet sind, jedoch als Orientierungshilfe oder als Vermessungspunkte für Satellitenbildkarten ausgezeichnet dienen können.

In der visuellen Differenzbildanalyse wurden von den zu überlagernden Bildpaaren je eine Dia-Positiv- und eine Negativ-Transparent-Vorlage verwendet. Im Durchlicht konnten sie optimal zur Deckung gebracht werden.

Die digitale Bildkorrelation hat sich für unsere Bedürfnisse am besten bewährt. Die beste Übereinstimmung von zwei Bildern

konnte über die Kreuzkorrelationsfunktion ermittelt werden. Lokale Verschiebungsbeträge (Translation) ergaben sich aus der Korrelation kleiner Bildteile. Mit diesen lokalen Translationen bestimmte man die Koeffizienten für folgende Abbildungen:

- affine Abbildung
- Polynomtransformation 2. Grades.

Die affine Abbildung hat sich als genügend genau erwiesen.

Digitale Bildinterpretation

Der multitemporale 20-Kanal-Datensatz ist mit Verfahren der überwachten Klassifikation ausgewertet worden; es sind:

- schrittweise, lineare Diskriminanz-Analyse
- Zentroidmethode (DCLASS)
- maximale Mutmasslichkeit (MCLASS)

Mit allen Verfahren gelang es, die wichtigsten Landnutzungskategorien zu unterscheiden. Klassiert wurden: Wasser, Schilf, Wald, überbautes Gebiet, Gerste, Roggen, Winterweizen, Sommerweizen, Kartoffeln, Zuckerrüben, Raps, Wiesen/Weiden, Mais und Rebhänge.

Der Vergleich mit einer in Landsat-Pixel digitalisierten Bodenkontrolle zeigte vor allem mit der schrittweisen, linearen Diskriminanz-Analyse eine gute Übereinstimmung.

Mit dem multitemporalen Datensatz wurde als ein Experiment eine Hauptkomponententransformation bezüglich der Variablen durchgeführt. Die drei ersten Hauptkomponenten von 20 Variablen sind als Farbbild dargestellt worden. Getreide, Wald und Wiesen/Weiden können so an der Farbe erkannt und getrennt kartiert werden.

Eine multitemporale Auswertung hat die Interpretierbarkeit von Landsat-Bilder wesentlich verbessert. Der zeitliche Aufwand für die Bildregistrierung kann zukünftig mit besser vorverarbeiteten Daten an einem interaktiven Bildbetrachtungssystem stark reduziert werden. Ein solches System wird auch die Interpretation (Stichprobenauswahl etc.) und deren Kontrolle merklich erleichtern. Damit wird es möglich auch grossflächig relativ detaillierte Landnutzungskartierungen resp. Inventuren durchzuführen.

SUMMARY

A land-use study with multispectral data of Landsat-1 and Landsat-2 has been accomplished on a testsite in the area of the "Grosses Moos" in Switzerland (about 47N, 7E). Sections of five different Landsat frames (from spring to autumn, 1976) of the same area have been registered digitally and a classification using various algorithms has been performed. The results of the classification show that in comparison with single-date interpretations, multitemporal data sets allow one to increase the number of distinguishable land-use categories considerably.

Image registration

To superimpose five Landsat frames of the same area, the following three methods have been tested:

- matchpoint method
- visual-difference picture analysis
- digital correlation.

The use of artificial matchpoints, set up using ground-based mirrors, has shown that determining their precise location within one pixel is possible. Due to irregularities of the geometry (after preprocessing), it is found that single pixels as matchpoints, though, are not reliable reference points for exact registration. However the method may be recommended for quick orientation by the interpreter or as bench-marks for satellite imagery maps.

In a visual-difference picture analysis, one compares a negative film of one the frames with a positive transparency of another using transmitted light. The best fit has been established by visually controlled displacements of one film relative to the other. The images must have good contrast for this purpose. For a determination of local displacements, however, the size of subframes may be too small.

The best method tested, the digital correlation, is based on the cross-correlation function. It permits one to find global

displacements between subframes and local displacements within subframes (by using small windows for correlation). The vectors of the displacements are the inputs for computing the coefficients of the following geometrical transformations:

- affine transformation
- polynomial transformation of the second degree.

The affine transformation has proved to be sufficient for our purposes.

Image interpretation

The multitemporal 20-variable data set has been classified with algorithms of supervised classifiers, such as:

- stepwise linear discriminant analysis
- euclidean distance
- maximum likelihood method.

The following land-use categories could be separated with all the mentioned classifiers: lake, reed, forest, built-up area, barley, rye, winter wheat, spring wheat, potatoes, rape, meadow/pasture, corn and vineyards.

The reliability for all categories has been 76% or higher. To check the results, the ground truth has been digitized in elements the size of Landsat pixels.

As an experiment for data compression, two multitemporal data sets have been transformed into their principal components with respect to the 20 variables. Component 1, 2 and 3 have been printed as a color picture. In such a display of the three first components out of 20, cereals, forest and meadow/pasture areas can be easily determined.

LITERATURVERZEICHNIS

Abkürzungen:

ERIM	Environmental Research Institute of Michigan Ann Arbor, Michigan USA
MPRSD	Machine Processing on Remotely Sensed Data
BuL	Bildmessung und Luftbildwesen, Karlsruhe BRD

- ABOTTEEN R.A., 1978: Principal Components Greenness Transformation in Multitemporal Agricultural Landsat Data. 12th Int. Symp. ERIM, 1978
- AHERN F.J., ROCHON G., 1977: Use of Clear Lakes as Standard Reflectors for Atmospheric Measurements. 11th Int. Symp. ERIM, 1977
- BAER O., 1979: Geographie der Schweiz. Lehrmittelverlag des Kantons Zürich
- BAEHR H.-P., SCHUHR W., 1974: Versuche zur Ermittlung der geometrischen Genauigkeit von ERTS-Multispektral-Bildern. BuL 1/74
- BARNEA D.I., SILVERMAN F.H., 1971: The Class of Sequential Similarity Dedection Algorithms (SSDA's) for Fast Digital Image Registration. IBM Reserch RC 3356 May 10, New York
- BAUMBERGER K., 1969: Klassifikation von landwirtschaftlichen Kulturen auf Farb- und Schwarzweissluftbildern mit Hilfe von Densitometermessungen und Computer. Diss. Univ. Zürich
- BENDIX, 1974: M-DAS Multispectral Data Analysis System BSR 4146B
- BERNSTEIN R., 1973: Results of Precision Processing of ERTS-1 Images Using Digital Processing Techniques. Proc. Symp. Significant Results Obtained from ERTS-1
- BINZEGGER R., 1975: ERTS-Multispektraldaten als Informationsquelle für thematische Kartierung. Diss. Univ. Zürich
- BOESCH H., BRASSEL K., KOCH P., SCHMID R., 1971: Contribution to Land Use Survey Methods. Geographical Publications Limited, London

- BORDEN F.Y. et al. 1975: Satellite and Aircraft Multispectral Scanner Digital Data Users Manual. ORSER Techn. Report 1-75
- BORIELLO L., DI GENNARO V., PREZIOSO G., 1979: Evaluation and Optimizations of Digital Images Resampling Algorithms. Congress of: Associazione Italiana per il Calcolo Automatico, Bari, Italy
- CNES, 1977: Proposal for an Earth Observation Space System. Centre National d'étude spatiale, January 1977
- COLVOCORESSES A.P., MCEWEN R.B., 1973: Progress in Cartography. Eros Program Proc. Symp. on Significant Results obtained from ERTS-1
- CICONE R.C., MALILA W.A., GLEASON J.M., NALEPKA R.F., 1976: Effects of Misregistration on Multispectral Recognition. MPRSD 1976
- CONDIT H.R., 1970: The Spectral Reflectance of American Soils. Photogrammetric Engineering Vol. 36 p.955-966
- COOLEY J.W., LEWIS R.A.W., WELCH P.D., 1967: Historical Notes on the Fast Fourier Transform. Proc. IEEE 55 S.1675-1677
- DIXON W.J. (ed.) 1970: BMD Biomedical Computer Programs. Univ. of California Press
- DORRER E., 1977: The Impact of Digital Image Processing on Photogrammetry and Cartography. Int. Symp. on Image Processing - Interaction with Photogrammetry and Remote Sensing, Graz/Austria
- ERICKSON J.D., 1979: The LACIE Experience in Satellite-Aided Global Crop Production Monitoring. Scope Conf. on the Role of Terrestrial Vegetation in the Global Carbon Cycle, Woods Hole Mass.
- EVANS Wm.E., 1974: Marking ERTS Images with a Small Mirror Reflector. Photogrammetric Engineering Vol. 40 S.665-671
- EVANS Wm.E., 1976: Effects of Sun Angle, Atmospheric Attenuation and Turbulence on Mirror Beacons for LANDSAT Image Control. Technical Report prepared for US. Geolog. Survey, Reston Virginia USA
- EXOTECH INCORPORATED, 1978: Landsat (ERTS) Ground Truth Radiometer Model 100-A Instruction Manual, Gaithersburg

- FASLER F., 1978: IBIS - Ein interaktives Bildinterpretationssystem. Int. Symp. on Remote Sensing for Obs. and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment. (ISP-IUFRO Symp.), Freiburg BRD
- FOLEY D.H., 1977: Considerations of Sample and Feature Size. IEEE Agrawala
Computers as Interpretation Material for Geoscientists. 2nd UN Regional Cartographic Conf. for the Americas, Mexico City, Sept. 1979
- HABERAECCKER P., KIRCHHOF W., KRAUTH E., KRITIKOS G., WINTER R., 1979: Computation of a Data Structure for a Topographic Map Using Multispectral Landsat Scenes. Int. Symp. ERIM
- HAEBERLE H., SAX H., WINTER R., 1979: Remote Sensing Possibilities and Limitations. UN Conf. on Science and Technology for Development, Vienna, August 1979
- HAEFNER H., 1965: Moderne Lufterkundungssysteme, Neue Züricher Zeitung, 18. Aug. Blatt 3
- HANDBOOK OF GEOPHYSICS AND ENVIRONMENTS, 1965, AFCRL, MacGray Hill
- HENDERSON R.G., 1975: Signature Extension Using the Masc Algorithm. Symp. on MPRSD
- ITTEN K.I., 1973: Verwendung thermaler Infrarot-Aufnahmen bei geographischen Untersuchungen. Diss. Univ. Zürich
- ITTEN K.I., FASLER F., 1979: Thematic Adaptive Spatial Filtering of Landsat Landuse Classification Results. 13th Int. Symp. ERIM
- ITTEN K.I., 1980: Grossräumige Inventuren mit Landsat Erd-erkundungssatelliten in der Schweiz. Univ. Zürich
- KANAL L., CHANDRASEKARAN B., 1977: On Dimensionality and Sample Size in Statistical Pattern Classification. IEEE-Press Agrawala
- KAUTH R.J., THOMAS G.S., 1976: The Tasselled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat. MPRSD 1976
- KELLERHALS D.P. und TROEHLER B., 1978: Hydrologische Karte Seeland 1:25'000 Blatt SW. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kanton Bern

- KIRBY E.W., 1975: A Solution of the Geometric Base Problem in LANDSAT-1 (ERTS-1) Multispectral Scanner Data by Means of an Affine Transformation and the Method of Least Squares. M.A. Thesis Univ. Waterloo, Ontario, Canada
- KIRCHHOF W., HABERAECCKER P., KRAUTH E., KRITIKOS G., WINTER R., 1978: Evaluation of LANDSAT Image Data for Land Use Mapping. IAF paper 78-118 Dubrovnik 1978, publ. in Acta Astronautica
- KOELBL O., 1973: Kombinierte Auswertung von Satelliten- und Luftbilder für topographische Karten. Diss. München
- KOSNECNY G., 1976: Mathematische Modelle und Verfahren zur geometrischen Auswertung von Zeilenabtaster-Aufnahmen. BuL 5/1976
- KRATKY V., 1974: Cartographic Accuracy of ERTS. Photogrammetric Engineering Vol. 40, No.2
- LANDSAT DATA USERS HANDBOOK, 1979: Revised Edition, US Geological Survey
- LARS, 1967 Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Purdue University, Lafayette Indiana. Research Bulletin, Annual Report
- LENZ G., GILGEN H., BLUM E., PASCHKE A., BENSTER R., 1978: Entwicklung eines interaktiven geographischen Bildverarbeitungssystems für Hochschulzwecke. Int. Symp. on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment, Freiburg BRD, July 1978
- LICHTENEGGER J., SEIDEL K., KUEBLER O., 1978: Methoden zur Überlagerung von LANDSAT-Bildern für multitemporale Landnutzungskartierungen. BuL, 2/1978
- LICHTENEGGER J., SEIDEL K., 1978: Multitemporal LANDSAT Data Sets as a Basis for Land Use Mapping. Int. Symp. on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment, Freiburg BRD, July 1978
- LINFOOT E.H., 1964: Fourierrmethods in Optical Image Evaluation. Focal Press, New York
- MACDONALD R.B., HALL F.G., ERB R.B., 1975: LACIE, The Large Area Crop Inventory Experiment an Assessment after one Year of Operation. Proc. 12th Symp. ERIM
- MANUAL OF REMOTE SENSING, VOL.II, 1975: The American Society of Photogrammetry

- MARSHALL Wm.W., BEHANE D., 1975: Investigation of the Enhancement of LANDSAT Imagery by the Overlay of Successive Images Cover the Same Scene. Final Report-75-3, MEAD Technology Laboratories, Dayton, Ohio USA
- MAURER H., 1965: Untersuchung zur Unterscheidbarkeit landwirtschaftlicher Kulturen im farbigen Luftbild. Diss. Univ. Zürich
- MEGIER J., 1977: Multi-temporal Digital Analysis of Landsat Data for Inventory of Poplar Planted Groves in N.Italy. Int. Symp. Image Processing, Interactions with Photogrammetry and Remote Sensing, Graz Austria
- MEIER R., 1980: Fernerkundungsmethoden zur Erfassung der Bodenfeuchtigkeit im hydrologischen Einzugsgebiet Rietholzbach. Diss. Univ. Zürich
- MORCIER C., MEYLAN P., MUSY A., 1979: Traitement d'image par classification. Inst. de genie rural EPFL, Lausanne
- MURI R., 1980: Verfahren zur grossräumigen, automatischen Klassifikation von Schnee. Arbeitstitel, Diss. Univ. Zürich
- NASA, 1972: Landsat Data Users Handbook. Goddard Space Flight Center, Greenbelt Maryland
- NASA, 1979: Landsat Data Users Notes, July/September
- NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY, 1976: Portrait U.S.A.
- NUESCH D., 1977: Landnutzungsinterpretation mit Hilfe multispektraler Abtastverfahren. Diss. Univ. Zürich
- OBUKHOV, ORLOV 1964: Spectral Reflectivity of the Major Soil Groups and Possibility of Using Diffuse Reflexion in Soil Investigations. Pochvovedeniye, No. 2
- OSTERHEIDER M., STEINER D., 1978: Glossar zur Fernerkundung. Geographisches Institut ETH Zürich
- OTTERMAN J., 1978: Single-scattering solution for radiative transfer through a turbid atmosphere. Applied Optics, Vol. 17, No. 21
- QUIEL F., 1977: A Branched Classification System Applied to Special Problems in Multispectral Data Analysis. Int. Symp. Image Processing - Interactions with Photogrammetry and Remote Sensing, Graz/Austria
- RAO V.R., BRACK E.J., MACK A.R., 1979 Effects of Surface Wind on the Spectral Signatures of Crops. Agronomy Journal Vol. 71 May/June

- READY P.J., WINTZ P.A., 1973: Information Extraction, SNR Improvement, and Data Compression in Multispectral Imagery. IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-21, No.10
- ROSENFELD A. ed., 1976: Digital Picture Analysis. Springer Verlag
- RUCHTI S., KUEBLER O., 1978: Application of Correlation Methods to Digital Image Data. Int. Conf. on Digital Signal Processing, Firenze, Italy
- SLATER P.N., 1979: A Re-Examination of the Landsat MSS. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol. 45 No. 11, p. 1479-1485
- STAENZ K., 1976: Messtheorie für den 4 Kanalradiometer EXOTECH 100-A. Geogr. Inst. Univ. Zürich
- STAENZ K., 1978: Atmosphärische Korrekturen von Multi-spektraldaten des Erderkundungssatelliten Landsat-2. Diss. Univ. Zürich
- SEIDEL K., 1976: Digitale Bildverarbeitung. Techn. Bericht. Photographisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich
- SEIDEL K., TOMAMICHEL F., LICHTENEGGER J., 1979: Entstehung einer Satellitenbildkarte. Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik 77. Jahrgang 6/79
- STEINER D., HAEFNER H., 1965: Tone Distortion for Automatic Interpretation. Photogrammetric Engineering XXXI, Nr.2
- STEINER D., 1960: Die Jahreszeit als Faktor bei der Land-nutzungsinterpretation auf panchromatischen Luftbildern. Diss. Univ. Zürich
- STEINER D., 1974: Digital Geometric Picture Correction Using a Piecewise Zero-Order Transformation. Remote Sensing of Environment 3, S.261-283.
- STEINER D., KIRBY M.E., 1977: Geometrical Referencing of LANDSAT Images by Affine Transformation and Overlaying of Map Data. Photogrammetria, 33 S.41-75
- SVEDLOW M., MCGILLEM C.D., ANUTA P.E., 1976: Experimental Examination of Similarity Measures and Preprocessing Methods Used for Image Registration. Conf. Proc. on MPRSD
- TELESPAZIO, 1976 : Format Specifications for Landsat MSS System Corrected Computer Compatible Tape. DPS.SES.NT/0230.02/200576, Roma

- TOM C., MILLER L.D., CHRISTENSON J.W., 1978: Spatial Land-Use Inventory, Modeling, and Projection/ Denver Metropolitan Area, with Inputs from Existing Maps, Airphotos, and Landsat Imagery. NASA Techn. Memorandum 79710
- TOUSSAINT T.G., 1977: Bibliography on Estimation of Misclassification. IEEE-Press Agrawala
- TRACHSLER H., 1978: Statistical Land Use Data Based on the Interpretation of Aerial Photographs and Sampling Methods. Proc. Int. Symp. on Remote Sensing of Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment, (ISP+IUFRO) Freiburg/Germany
- UEBERLA K., 1968: Faktorenanalyse. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- WALDMEIER M., 1968: Leitfaden der astronomischen Orts- und Zeitbestimmung. Verlag Sauerländer, Aarau
- WEBER W.F., 1973: Techniques for Image Registration. Conf. Proc. on MPRSD 1973
- WHEELER S.G., MISRA P.N., 1976: Liniar Dimensionality of Landsat Agricultural Data with Implications for Classification. MPRSD
- WONG R.Y., HALL E.L., 1978: Sequential Hierarchical Scene Matching. IEEE Transactions on Computers, Vol. C-27, No.4, April 1978

ANHANG 1

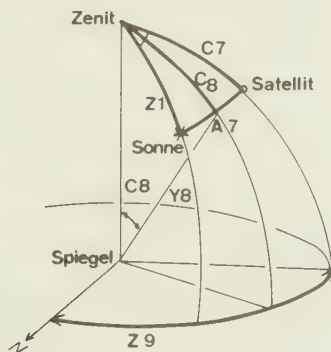
FORMELN FUER DIE JUSTIERUNG VON SPIEGELREFLEKTOREN (Spiegelexperiment Kap. C.1.)

In den Formeln verwendete Variablen (Waldmeier 1968):

- B4 Geogr. Breite der Spiegelposition
- D4 Geogr. Länge der Spiegelposition
- C4 Geogr. Breite des Bildzentrums (Frame center)
- E4 Geogr. Länge des Bildzentrums
- A4 Bogendistanz Spiegelposition-Bildzentrum
- B5 Bogendistanz Spiegelposition-Subsatellitenpunkt
- S Skew-Winkel
- H Kurs gegenüber der rotierenden Erde (Nominal+Skew)
- H1 Höhe des Satelliten über der Erdoberfläche
- I1 Inklinasion des Satelliten 80.91 Grad
- R1 Erdradius
- C7 Zenitdistanz des Satelliten
- Z1 Zenitdistanz der Sonne
- D1 Deklination der Sonne
- S1 Stundenwinkel
- E1 Zeitgleichung (wahre minus mittlere Zeit)
- A1 Azimut der Sonne zu Süd
- C8 Zenitdistanz der Spiegelachse
- Z9 Azimut der Spiegelachse

Nominalkurs des Satelliten:

$$\text{Nominalkurs} = \sin^{-1} \left(\frac{\cos(I1)}{\cos(C4)} \right)$$



Bogendistanz B5 und Zenitdistanz C7 Spiegelposition-Satellit:

$$Z4 = E4 - D4$$

$$\cos(A4) = \sin(C4) * \sin(B4) + \cos(B4) * \cos(C4) * \cos(Z4)$$

$$\sin(Y1) = \frac{\cos(C4) * \sin(Z4)}{\sin(A4)}$$

$$Y2 = H - \sin^{-1} \left(\frac{\cos(Y1) * \cos(B4)}{\cos(C4)} \right)$$

$$\sin(B5) = \frac{\cos(Y2) * \sin(A4)}{\sin(90+S)}$$

$$Q1 = \cos(B6) * (R1+H1) - R1$$

$$Q2 = \sin(B6) * (R1+H1)$$

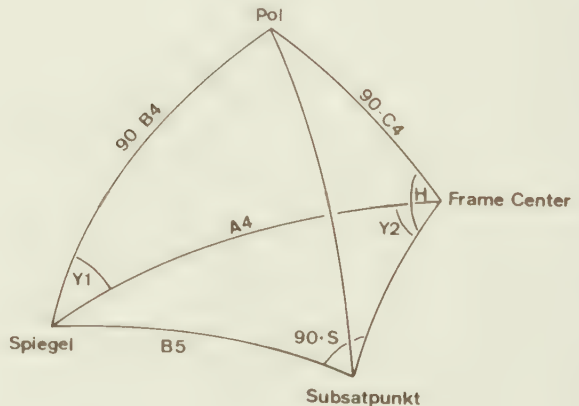
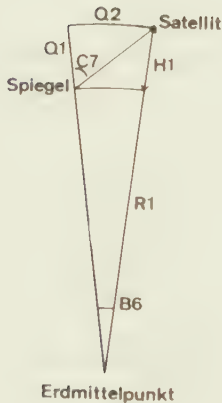
$$\tan(C7) = \frac{Q1}{Q2}$$

Zenitdistanz Z1 und Azimut A1 der Sonne:

$$\cos(Z1) = \sin(B4) * \sin(D1) + \cos(B4) * \cos(S1) * \cos(D1)$$

$$S1 = (GMT) - 12 - (D4 \text{ in Min.}) + E1$$

$$\tan(A1) = \frac{\cos(D1) * \sin(S1)}{\cos(D1) * \sin(B4) * \cos(S1) - \sin(D1) * \cos(B4)}$$



Azimet Z9 und Zenitdistanz C8 der Spiegelachse:

$Z7' = (180+A1) - (H-S-90)$ falls Subsat.punkt und Sonne östl.
der Spiegelposition

$Z7 = 360 - Z7'$ falls Spiegelposition zwischen Subsat.punkt
und Sonne

$\cos(A7) = \cos(z1)*\cos(C7) + \sin(Z1)*\cos(C7)*\cos(Z7)$

$A8 = A7/2$

$\sin(Y8) = \frac{\sin(C7)*\sin(Z7)}{\sin(A7)}$

$\cos(C8) = \cos(A8)*\cos(Z1) + \sin(A8)*\sin(Z1)*\cos(Y8)$

$\sin(Z8) = \frac{\sin(A8)*\sin(Y8)}{\sin(C8)}$

$Z9 = A1 - Z8$ (falls $Z7'$ zutrifft)

$Z9 = A1 + Z8$ (falls $Z7$ zutrifft)

ANHANG 2

EFFEKT VON SPIEGELREFLEKTOREN IN LANDSAT-DATEN (Spiegelexperiment Kap. C.1.)

Es wird der Strahlungszuschlag diskutiert, der von einer spiegelnden Fläche zu erwarten ist. EVANS (1976) gibt folgende Formeln dazu an:

$$IM = \frac{EO * dL * AM * \cos(v/2) * TM * t * S}{wM}$$

IM = Strahlungsenergie des Reflektors
Watt/Meter²*Steradians; (Steradians=sr, Watt=W)
EO = Sonneneinstrahlung über der Atmosphäre in
W/m²*μ
dL = spektrales Intervall in Mikron (μ)
AM = Spiegelfläche
v = Zenitdistanz der Sonne
TM = Reflexionsfaktor des Spiegels
t = Transmissionsfaktor der Atmosphäre
S = Szintillationsfaktor der Atmosphäre
wM = Divergenz des reflektierten Strahles in Steradians
Z = Zuschlag in Anzahl Bits
NF = Maximalempfindlichkeit des Sensors nach NASA (1972)
AF = Bodenfläche, die vom Sensor erfasst wird

In einem 8-Bit-Messwert beträgt dieser Zuschlag

$$Z = 256 * \frac{IM}{NF * AF}$$

Für den Landsat-Überflug vom 18. Oktober 1976 setzten wir folgende Werte in die obige Formel ein:

EO = 838 W/m²*μ nach HANDBOOK OF GEOPHYSICS (1965)
dL = 0.3 μ Bandbreite Kanal 7
v = 54.91 Grad nach Formel in Anhang 1 für 10.02 MEZ
AM = 0.0225cm², Spiegelfläche 15*15cm²
t = 0.38 aus Formel:

$$t = \frac{m}{EO} \quad ; \quad m = \frac{1}{\cos(v)}$$

Die direkte Sonnenstrahlung E sun wurde mit einem Radiometer EXOTECH 100-A zur Zeit des Überfluges gemessen. Sie betrug 80 W/m²*u.

- TM = 0.61 Dieser Werte wurde auch mittels Radiometer
experimentell bestimmt.
- S = 1. Die Szintillation ist schwierig zu bestimmen und
kann lokal stark schwanken. Sie erhöht weiter die
Ungenauigkeit des Resultates.
- NF = Maximalempfindlichkeit nach NASA (1972) für Kanal 7
24.8W/m²*sr
- AF = Fläche, die der Sensor am Boden erfasst 79*79 m².
- IM = 13kW/m²
- Z = 11 Zähleinheiten in 8-Bit-Messwerten.

Für die kurze Diskussion des Ergebnisses wird auf das
Kap C.1.4. verwiesen.

ANHANG 3

DIGITALE VERARBEITUNG VON FERNERKUNDUNGSDATEN AN DEN ZÜRCHER HOCHSCHULEN (EINE ZUSAMMENSTELLUNG)

Geographischen Institut der ETHZ: Interaktives Bildbe-
trachtungssystem ZAR, PDP 11/40 - RAMTEK GX-100B (LENZ
et al. 1978). Programmbibliothek "METEO" (A. Paschke).

Geographisches Institut der Universität: Interaktives
Bildinterpretationssystem IBIS (FASLER 1978).

Institut für Kommunikationstechnik der ETHZ: Programm-
bibliothek PHOTOS (SEIDEL 1976). Programme für digitale
Bildkorrelation (RUCHTI und KUEBLER 1978). PHOTOMATION
der Fa. Optronics (FUNKHOUSER 1978)

Liste der in der Arbeit verwendeten Computer-Programme:

Folgende Programme, die an der CDC 6400/6500 - CYBER 174 am
Rechenzentrum der ETHZ implementiert sind, wurden benutzt.
Aus der Bibliothek "METEO":

- TIPS: Formatiert Landsat-Daten von TELESPIAZIO
ins Zürcher Daten Format (ZDF) um.
- ZDFK: Erlaubt eine Bildkoordinaten-Änderung in
der Headerinformation.
- ZDFC: Wählt einen Bildausschnitt aus.
- ZDFV: Vereinigt zwei Bilder (das Resultatbild
enthält die Summe der Kanäle der Einzel-
bilder).
- DREH: Programm für geometrischen Transformatio-
nen von Rasterdaten.
- PPD: Parallelepiped-Klassifikation
mit Ausgabe einer Graustufendarstellung
oder eines ZDF-File.

Aus der Bibliothek "PHOTOS":

- SUBDIS: Extrahiert Stichproben aus einem ZDF-File.
- BDSTAT: Druckt die Wertematrix eines beliebigen
Bildausschnittes aus.
- BMD7MT: Bestimmt die Gewichte (Koeffizienten) nach
der linearen, schrittweisen Diskriminanz-
Analyse (DIXON 1970).
- CLA7MT: Übernimmt die Koeffizienten (Trenn-
funktion aus dem BMD7MT) und klassiert
einen Datensatz.
- CLUS: Cluster-Bildungsprogramm (BORDEN et al.
1975).
- CORZDF: Programm zur digitalen Kreuzkorrelation.
Es findet u.a. die Verschiebungsbeträge
zwischen zwei Bildausschnitten.

Programme an der IBM 370/155 am Rechenzentrum der Universität.

Aus der Bibliothek "BIS" und "IBIS":

- IBZDF/
- ZDFIB: Umformatierungsprogramme vom PSU-Format ins ZDF, resp. umgekehrt.
- MAP: Darstellen von Rasterdaten und Ausgabe auf den Papierdrucker oder als PSU-File.
- PPD: Klassifikation nach dem Parallelepiped-Verfahren.
- DCLASS: Klassifikation nach dem Distanzverfahren.
- MCLASS: Klassifikation nach der maximalen Mutmasslichkeit.
- HAUKO: Hauptkomponentenanalyse.
- GLAETT: Digitaler Glättungsfilter.

Programme am Tischrechner HP-9830A:

- EXOTECH: Dient zum Umrechnen von Spektralmessungen in relative und absolute Werte.
- SPIEGEL: Berechnet Azimut und Elevation für die Spiegeljustierung.
- GEBIET: Digitalisiert Grenzen aus der Karte in Landsat-Bildkoordinaten.
- AFFIN/
DREH/
POLYNOM: erlaubt die Berechnung der Koeffizienten für geometrische Transformationen.

LEBENS LAUF

Ich, Jürg Lichtenegger, Bürger von Köllikon (AG), wurde am 19. Mai 1943 in Murten geboren, wo ich die Primar- und Sekundarschule besuchte. Nach 2 Jahren Verkehrsschule an der Ecole Supérieure de Commerce in Neuchâtel absolvierte ich eine Lehre als Radiotelegraphist. Von 1964 bis 1968 versah ich den Dienst eines Radio-Offiziers auf Schiffen der schweizerischen Hochseeflotte. 1970 bestand ich die eidgenössische Matura Typus C. Ich immatrikulierte mich an der Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich mit dem Hauptfach Geographie. 1975 erhielt ich das Diplom für Naturwissenschaften. Seit 1976 bin ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei einem Nationalfonds-Projekt tätig und arbeite unter der Leitung von Prof. Dr. H. Haefner am Geographischen Institut der Universität an meiner Dissertation.

Vorlesungen, Übungen und Exkursionen besuchte ich bei:

Geographie: Bachmann, Bär, Bögli, Boesch, Egli, Elsasser, Graf, Fitze, Furrer, Gutermann, Guyan, Haefner, Itten, Kilchenmann, Leemann, Müller, Schmid, Steffen, Steiner, Tanner

Geologie: Büchi, Dal Vesco, Dünner, Gansser, Hantke, Jäckli, Milnes, Trümpy

Physik: Brun, Kündig, Staub, Waldner

Botanik: Cook, Endress, Jungen-Hauschteck, de Mendoza-Heuer, Pflugshaupt, Rohweder, Rast, Schlittler, Stäuble, Stüssi, Schweingruber, Thomas, Wanner

Mathematik: van den Waerden, Wyler

Klimatologie/Meteorologie: Dütsch, Federer, Gensler, Kuhn, Schüepp

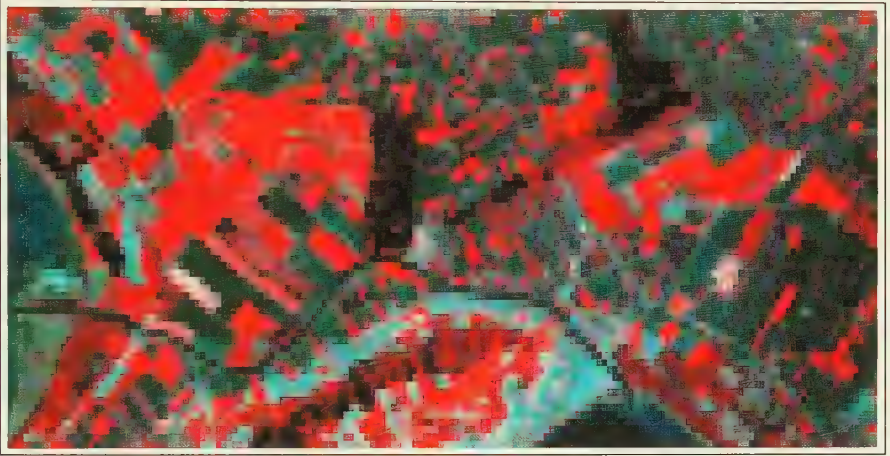
Didaktik: Inhelder, Woodtli

Volkskunde: Niederer

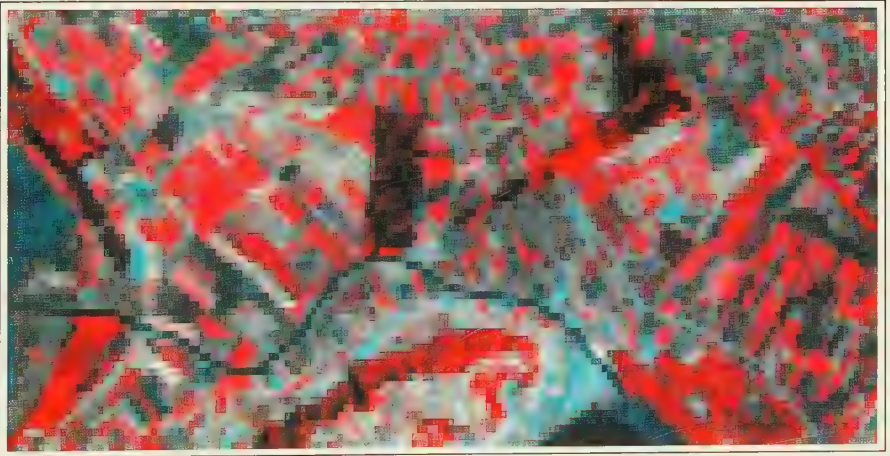
Bildwissenschaften: Kübler, Seidel

False Color Images reproduced from Landsat-Data
(Testsite "Grosses Moos")

a)

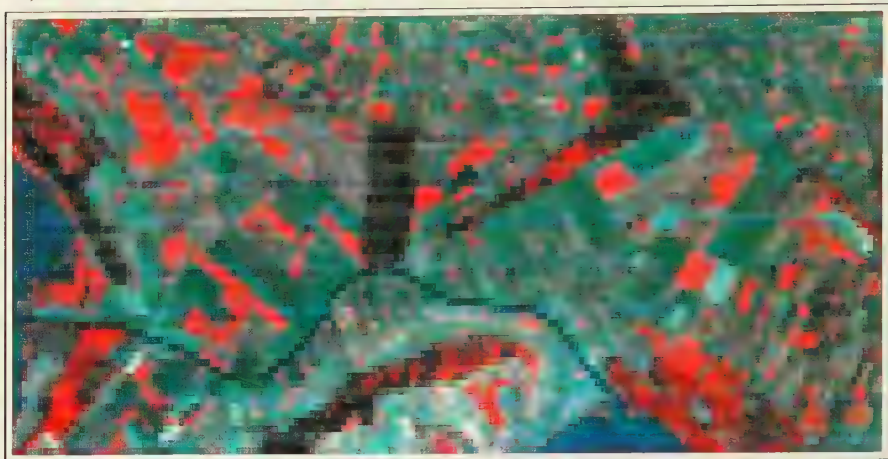


b)

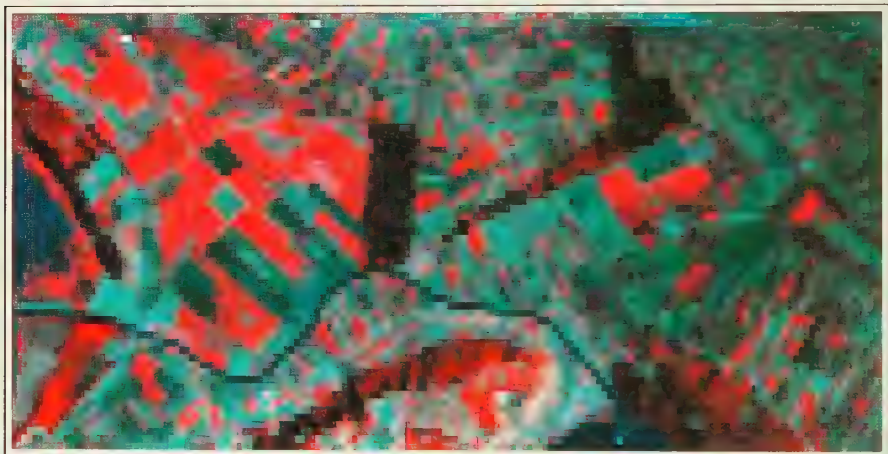


- a) May 15, 1976 Section of E-1392-09124
- b) June 19, 1976 Section of E-1427-09043
- c) July 17, 1976 Section of E-2542-09370
- d) August 3, 1976 Section of E-2559-09305
- e) September 18, 1976 Section of E-1518-09024

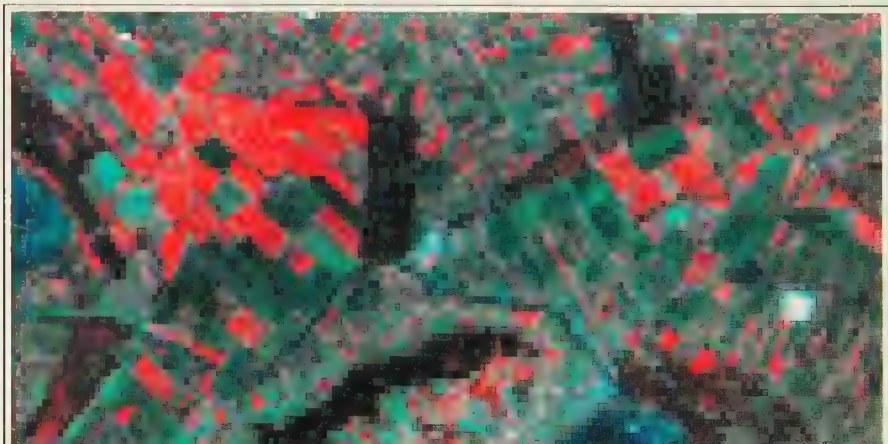
c)



d)



e)



"GROSSES MOOS": Land Use Map 1976 (M 1:84300)

Classification of Multitemporal Landsat-MSS-Data



Ground Truth within Selected Areas

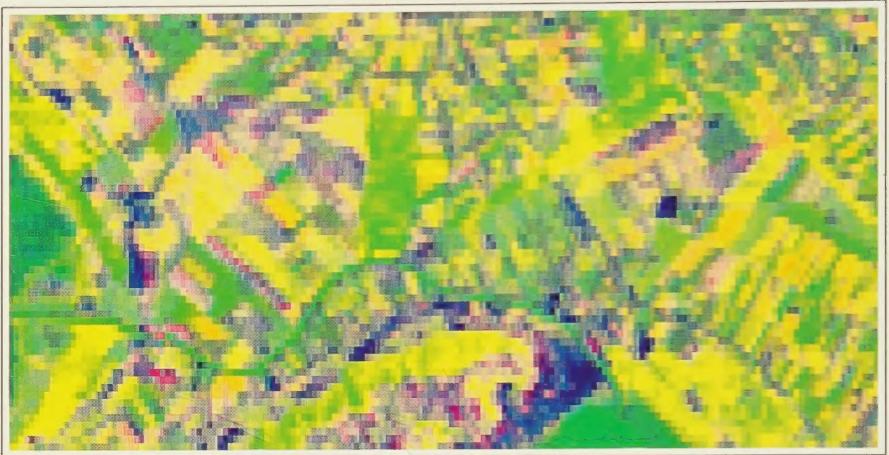


Legend:

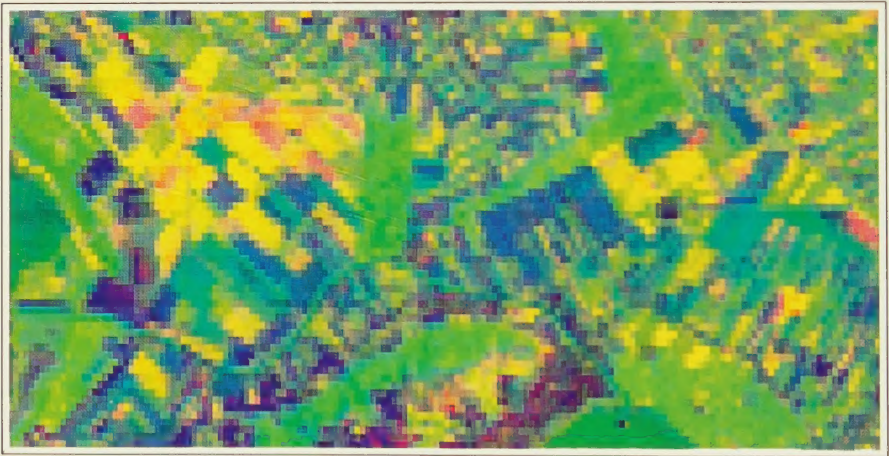
 See - lake	 Kartoffeln - potatoes
 Schilf - reed	 Zuckerrüben - sugar beet
 Wald - forest	 Raps - rape
 Überbaut - built up	 Wiese/Weide - meadow/pasture
 Gerste - barley	 Mais - corn
 Roggen - rye	 Reben - vineyards
 W.Weizen - w.wheat	 Keine Bodenkontrolle
 S.Weizen - s.wheat	no ground truth

"GROSSES MOOS": Representation of the Principal Components from Multitemporal Landsat-MSS-Data

Component 1, 2, 3 out of 8 Bands (May, June)



Component 1, 2, 3 out of 20 Bands (May to Sept.)



Component	Dye	% per Eigenvalue	
		8 Bands	20 Bands
1	yellow	48.5	35.6
2	magenta	30.2	21.7
3	cyan	11.0	9.7
Sum	----	89.7	67.0

